# EL AZAR Y LA NECESIDAD

## Jacques Monod




BIBLIOTECA DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

*Biblioteca*
*de Divulgación Científica*



# EL AZAR
# Y LA NECESIDAD

JACQUES MONOD

# EL AZAR Y LA NECESIDAD

(ENSAYO SOBRE LA FILOSOFÍA NATURAL DE LA BIOLOGÍA MODERNA)

EDICIONES ORBIS, S.A.

Título original: *Le hasard et la necessité (Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne)* (1970).
Traducción: Francisco Ferrer Lerín,
revisada por el prof. Antonio Cortés Tejedor.

Asesor científico de la colección: Pedro Puigdoménech.

Dirección de la colección: Virgilio Ortega






ISBN: 84-7634-234-9
D.L.: B-27516-1985

Impreso y encuadernado por
Printer, industria gráfica s.a. Provenza, 388 Barcelona
Sant Vicenç dels Horts

*Printed in Spain*

*Todo lo que existe en el Universo es fruto del azar y de la necesidad.*

Demócrito

*En ese instante sutil en que el hombre vuelve sobre su vida, Sísifo, regresando a su roca, contempla esa serie de actos inconexos que devienen su destino, creado por él, unido bajo la mirada de su memoria y en seguida sellado por su muerte. Así, persuadido del origen completamente humano de todo lo que es humano, ciego que desea ver y que sabe que la noche no tiene fin, está siempre en marcha. La roca todavía rueda. ¡Abandono a Sísifo al pie de la montaña! Siempre torna a encontrar su fardo. Mas Sísifo enseña la fidelidad superior que niega los dioses y conmueve las rocas. Él mismo juzga que todo está bien. Ese universo, en adelante sin dueño, no le parece ni estéril ni fútil. Cada grano de esa roca, cada destello mineral de esa montaña, plena de noche, para él forma un mundo. La propia lucha hacia la cumbre basta para henchir el corazón de un hombre. Hay que imaginar a Sísifo dichoso.*

Albert Camus
*Le mythe de Sisyphe*

# PREFACIO

La biología ocupa, entre las ciencias, un lugar a la vez marginal y central. Marginal en cuanto que el mundo viviente no constituye más que una parte ínfima y muy «especial» del universo conocido, de suerte que el estudio de los seres vivos no parece poder lograr jamás la revelación de unas leyes generales, aplicables fuera de la biosfera. Pero si la ambición última de la ciencia entera es fundamentalmente, como creo, dilucidar la relación del hombre con el Universo, entonces es justo reconocer a la biología un lugar central puesto que es, entre todas las disciplinas, la que intenta ir más directamente al centro de los problemas que se deben haber resuelto antes de poder proponer el de la «naturaleza humana», en unos términos que no sean metafísicos.

Así, la biología es, para el hombre, la más significativa de todas las ciencias; es la que ha contribuido ya, sin duda, más que ninguna otra, a la formación del pensamiento moderno, profundamente trastornado y definitivamente marcado en todos los terrenos: filosófico, religioso y político, por el advenimiento de la teoría de la evolución. Sin embargo, por segura que estuviese desde el fin del siglo XIX de su validez fenomenológica, la teoría de la evolución, aunque dominando la biología entera, permanecía como suspendida mientras no se elaborara una teoría *física* de la herencia. La esperanza de conseguirla rápidamente parecía casi quimérica hace treinta años a pesar de los éxitos de la genética clásica. Sin embargo, es esto lo que hoy aporta la teoría molecular del código genético. Interpreto aquí la «teoría del código genético» en un sentido amplio, para incluir no solamente las nociones relativas a la estructura química del material heredi-

tario y de la información de la que es portador, sino también los mecanismos moleculares de expresión, morfogenética y fisiológica de esta información. Definida así, la teoría del código genético constituye la base fundamental de la biología. Lo que no significa, desde luego, que las estructuras y funciones complejas de los organismos puedan ser *deducidas* de la teoría, ni siquiera que sean siempre analizables directamente a escala molecular. (No se puede predecir ni resolver toda la química con la ayuda de la teoría cuántica, que sin duda constituye, no obstante, la base universal.)

Pero si la teoría molecular del código no puede hoy (y sin duda no podrá jamás) predecir y resolver toda la biosfera, constituye desde ahora una teoría general de los sistemas vivientes. No había nada parecido en el conocimiento científico anterior al advenimiento de la biología molecular. El «secreto de la vida» podía entonces parecer inaccesible en su mismo principio. Hoy está en gran parte desvelado. Este considerable acontecimiento parece debería influir enormemente en el pensamiento contemporáneo desde el momento en que la significación general y el alcance de la teoría fuesen comprendidos y apreciados más allá del círculo de los especialistas puros. Espero que el presente ensayo contribuya a ello. Antes que las nociones mismas de la biología moderna, es su «forma» lo que he intentado destacar, así como explicar sus relaciones lógicas con otros terrenos del pensamiento.

Resulta imprudente hoy en día, por parte de un hombre de ciencia, emplear la palabra «filosofía», aun siendo «natural» en el título (o incluso en el subtítulo) de una obra. Se tiene la seguridad de que será acogida con desconfianza por los científicos y, a lo mejor, con condescendencia por los filósofos. No tengo más que una excusa, pero la creo legítima: el deber que se impone, hoy más que nunca, a los hombres de ciencia de considerar a su disciplina dentro del conjunto de la cultura moderna, para enriquecerla no sólo de conocimientos técnicos importantes, sino también de las ideas salidas de su ciencia, que puedan considerarse humanamente significativos. La ingenuidad misma de una visión nueva (la de la ciencia siempre lo es) puede a veces iluminar con un nuevo día antiguos problemas.

Desde luego hay que evitar toda confusión entre las ideas *sugeridas* por la ciencia y la ciencia misma; pero hay que llevar hasta sus límites las conclusiones que la ciencia autoriza, a fin de revelar su plena significación. Ejercicio difícil. Yo no preten-

do haber realizado la empresa sin caer en errores. Digamos que la parte estrictamente biológica de este ensayo no es en absoluto original. No he hecho más que resumir nociones consideradas como establecidas por la ciencia contemporánea. La importancia relativa atribuida a diferentes desarrollos, como la elección de los ejemplos propuestos, reflejan, es cierto, tendencias personales. Incluso capítulos importantes de la biología no son mencionados. Repito otra vez que este ensayo no pretende exponer toda la biología sino que intenta extraer la quintaesencia de la teoría molecular del código. Indudablemente, soy responsable de las generalizaciones ideológicas que he creído poder deducir. Mas no creo equivocarme al decir que estas interpretaciones, mientras no salgan del terreno de la epistemología, encontrarán el asentimiento de la mayoría de los modernos biólogos. Asumo la total responsabilidad de los desarrollos de orden ético, si no político, que no he querido eludir, por peligrosos que fuesen o por ingenuos o demasiado ambiciosos que puedan, a pesar mío, parecer: la modestia conviene al sabio, pero no a las ideas que posee y que *debe* defender. Y aquí tengo la seguridad, tranquilizadora, de hallarme en total acuerdo con ciertos biólogos contemporáneos cuya obra merece el mayor respeto.

He de solicitar la indulgencia de los biólogos, por ciertos planteamientos que les parecerán fastidiosos, y la de los no biólogos por la aridez de exposición de ciertas nociones «técnicas» inevitables. Los apéndices podrán ayudar a algunos lectores a superar estas dificultades. Mas querría insistir sobre el hecho de que la lectura no es de ningún modo indispensable para quien no tiene que afrontar directamente las realidades químicas de la biología.

Este ensayo se basa en una serie de conferencias (las «Robbins Lectures») pronunciadas en febrero de 1969 en el Pomona College, en California. Agradezco a la dirección de este instituto por haberme dado la posibilidad de desarrollar, ante un joven y ardiente público, ciertos temas que, desde largo tiempo, son para mí objeto de reflexión, mas no de enseñanza. Análogamente, he hecho de estos temas el motivo de un curso en el Collège de France durante el año escolar 1969-1970. Es una hermosa y preciada institución que autoriza a sus miembros a rebasar, a veces, los estrictos límites de la enseñanza que se le ha confiado. Gracias a Guillaume Budé y a François I.

*Clos Saint-Jacques*
*Abril 1970*

# 1

# Extraños objetos

*Lo natural y lo artificial*

La distinción entre objetos artificiales y objetos naturales nos parece inmediata y sin ambigüedad. Un peñasco, una montaña, un río o una nube son objetos naturales; un cuchillo, un pañuelo, un automóvil son objetos artificiales, artefactos.[1] Cuando se analicen estos juicios, se verá, sin embargo, que no son inmediatos ni estrictamente objetivos. Sabemos que el cuchillo ha sido configurado por el hombre con vistas a una utilización, a una *performance*[2] considerada con anterioridad. El objeto materializa la intención preexistente que lo ha creado y su forma se explica por la *performance* que era esperada incluso antes de que se cumpliera. Nada de esto para el río o el peñasco que sabemos o pensamos han sido configurados por el libre juego de fuerzas físicas a las que no sabríamos atribuir ningún «proyecto». Todo ello suponiendo que aceptamos el postulado base del método científico: la Naturaleza es *objetiva* y no *proyectiva.*

Es, pues, por referencia a nuestra propia actividad, consciente y proyectiva, por ser nosotros mismos fabricantes de artefactos, que calibramos lo «natural» o lo «artificial» de un objeto cualquiera. ¿Sería entonces posible definir por criterios objetivos y generales las características de los objetos artificiales, productos de una actividad proyectiva consciente, por oposición a los

1. En sentido propio, productos del arte, de la industria.
2. En general, el autor, da a *performance* un sentido próximo a logro, a ejecución conseguida. *(N. del T.)*

objetos naturales, resultantes del juego gratuito de las fuerzas físicas? Para asegurarse de la entera objetividad de los criterios escogidos, lo mejor sería sin duda preguntarse si, utilizándolos, se podría redactar un programa que permitiera a una calculadora distinguir un artefacto de un objeto natural.

Un programa así podría encontrar aplicaciones de sumo interés. Supongamos que una nave espacial deba posarse próximamente en Venus o en Marte; una cuestión importantísima sería el conocer si estos planetas están o han sido habitados por seres inteligentes capaces de una actividad proyectiva. Para descubrir tal actividad, presente o pasada, son evidentemente *sus productos* lo que se deberá reconocer, por diferentes que sean de los frutos de la industria humana. Desconociéndolo todo de la naturaleza de tales seres, y de los proyectos que podrían haber concebido, será necesario que el programa no utilice más que criterios muy generales, basados exclusivamente en la estructura y la forma de los objetos examinados, prescindiendo de su función eventual.

Vemos que los criterios a emplear serán dos: 1.º, regularidad; 2.º, repetición.

Mediante el criterio de regularidad se consideraría el hecho de que los objetos naturales, configurados por el juego de las fuerzas físicas, no presentan casi nunca estructuras geométricas simples: superficies planas, aristas rectilíneas, ángulos rectos, simetrías exactas por ejemplo; mientras que los artefactos presentarían en general tales características, aunque sólo fuera de forma aproximada y rudimentaria.

El criterio de repetición será sin duda el más decisivo. Materializando un proyecto, artefactos homólogos, destinados al mismo uso, reproducen renovadamente, de modo muy aproximado, las intenciones constantes de su creador. Bajo este punto de vista, el descubrimiento de numerosos objetos de formas bastante bien definidas sería pues muy significativo.

Tales podrían ser, descritos brevemente, los criterios generales utilizables. Debe precisarse, además, que los objetos a examinar serían de dimensiones *macroscópicas,* pero no *microscópicas.* Por «macroscópicas» hemos de entender las dimensiones medibles en centímetros; por «microscópicas» las dimensiones que se expresan normalmente en Angström (1 cm = $10^8$ Angström). Esta precisión es indispensable porque, a escala microscópica, se tendría acceso a estructuras atómicas o moleculares cuyas geometrías simples y repetitivas no testimoniarían eviden-

temente una intención consciente y racional, sino las leyes químicas.

*Las dificultades de un programa espacial*

Supongamos el programa escrito y la máquina realizada. Para someter sus *performances* a la prueba, no habría nada mejor que hacerla operar sobre objetos terrestres. Invirtamos nuestras hipótesis, e imaginemos que la máquina ha sido construida por los expertos de la NASA marciana, deseosos de detectar en la Tierra los testimonios de una actividad organizada, creadora de artefactos. Y supongamos que la primera nave marciana aterriza en el bosque de Fontainebleau, por ejemplo cerca de Barbizon. La máquina examina y compara las dos series de objetos más destacables de los alrededores: las casas de Barbizon por un lado y las peñas de Barbizon por otro. Utilizando los criterios de regularidad, de simplicidad geométrica y de repetición, decidirá fácilmente que las peñas son objetos naturales, mientras que las casas son artefactos.

Centrando ahora su atención sobre objetos de dimensiones más reducidas, la máquina examina unos pequeños guijarros, descubriendo al lado de ellos cristales, por ejemplo de cuarzo. Siguiendo los mismos criterios, deberá evidentemente llegar a la conclusión de que, si bien los guijarros son naturales, los cristales de cuarzo son objetos artificiales. Juicio que parece justificar un «error» en la estructura del programa. «Error» cuyo origen además es interesante: si los cristales presentan formas geométricas perfectamente definidas, es que su estructura macroscópica refleja directamente la estructura microscópica, simple y repetitiva de los átomos o moléculas que los constituyen. El cristal, en otros términos, es la expresión macroscópica de una estructura microscópica. Este «error» sería por otra parte fácil de eliminar ya que todas las estructuras cristalinas *posibles* son conocidas.

Pero supongamos que la máquina estudia ahora otro tipo de objeto: una colmena de abejas silvestres, por ejemplo. Encontraría evidentemente todos los criterios de un origen artificial: estructuras geométricas simples y repetitivas del panal y de las células constituyentes, por lo que la colmena sería clasificada en la misma categoría de objetos que las casas de Barbizon. ¿Qué pensar de este juicio? Sabemos que la colmena es «artificial» en el sentido que representa el producto de la actividad de las abe-

jas. Mas tenemos buenas razones para creer que esta actividad es estrictamente automática, actual pero no conscientemente proyectiva. Además, como buenos naturalistas, consideramos a las abejas como seres «naturales». ¿No hay pues una contradicción flagrante al considerar como «artificial» el producto de la actividad automática de un ser «natural»?

Prosiguiendo la encuesta pronto se vería que si hay contradicción no es por culpa de un error de programación, sino de la ambigüedad de nuestros juicios. Porque si la máquina examina ahora no la colmena, sino las mismas abejas, no podrá ver más que objetos artificiales altamente elaborados. El examen más superficial revelará elementos de simetría simple: bilateral y translacional. Además y sobre todo, examinando abeja tras abeja, el programa observará que la extrema complejidad de su estructura (número y posición de los pelos abdominales, por ejemplo, o nerviaciones de las alas) se encuentra reproducida en todos los individuos con una extraordinaria fidelidad. Prueba segura de que estos seres son los productos de una actividad deliberada, constructiva y del orden más refinado. La máquina, sobre la base de tan decisivos documentos, no podría más que señalar a los oficiales de la NASA marciana su descubrimiento, en la Tierra, de una industria mucho más evolucionada que la suya.

El rodeo que hemos efectuado a través de lo que sólo es en pequeñísima parte ciencia ficción, estaba destinado a ilustrar la dificultad de definir la distinción que, sin embargo, nos parece intuitivamente evidente entre objetos «naturales» y «artificiales». En efecto, sobre la base de criterios estructurales (macroscópicos) es sin duda imposible llegar a una definición de lo artificial que, incluyendo todos los «verdaderos» artefactos, como los productos de la industria humana, excluya objetos tan evidentemente naturales como las estructuras cristalinas, así como los seres vivientes mismos, que no obstante querríamos igualmente clasificar entre los sistemas naturales.

Reflexionando sobre la causa de las confusiones (¿aparentes?) a las que conduce el programa, se pensará sin duda que ellas surgen por la limitación a que hemos sometido el mismo al ceñirnos a las consideraciones de forma, de estructura, de geometría, privando de este modo a la noción de objeto artificial de su contenido esencial: que un objeto de este tipo se define, se explicó al principio, por la función que está destinado a cumplir, por la *performance* que espera su inventor. Sin embargo se verá

en seguida que programando en adelante la máquina para que estudie no sólo la estructura, sino las *performances* eventuales de los objetos examinados, se llegará a resultados aún más engañosos.

## *Objetos dotados de un proyecto*

Supongamos por ejemplo que este nuevo programa permite efectivamente a la máquina analizar correctamente las estructuras y las *performances* de dos series de objetos, tales como caballos corriendo en un campo y automóviles circulando por una carretera. El análisis llevará a la conclusión de que estos objetos son comparables, en cuanto están concebidos unos y otros para ser capaces de realizar desplazamientos rápidos, aunque sobre superficies diferentes, lo que demuestra sus diferencias de estructura. Y si, para tomar otro ejemplo, proponemos a la máquina comparar las estructuras y las *performances* del ojo de un vertebrado con las de un aparato fotográfico, el programa no podrá más que reconocer las profundas analogías; lentes, diafragma, obturador, pigmentos fotosensibles: los mismos componentes no pueden haberse dispuesto, en los dos objetos, más que con vistas a obtener *performances* muy parecidas.

He citado este ejemplo, clásico, de adaptación funcional en los seres vivos, para subrayar lo estéril y arbitrario de querer negar que el órgano natural, el ojo, representa el término de un «proyecto» (el de captar imágenes) tan claro como el que llevó a la consecución del aparato fotográfico. Por lo que sería absurdo no llegar, en un último análisis, a la conclusión de que el proyecto que «explica» el aparato no sea el mismo que dio al ojo su estructura. Todo artefacto es un producto de la actividad de un ser vivo que expresa así, y de forma particularmente evidente, una de las propiedades fundamentales que caracterizan sin excepción a todos los seres vivos: la de ser *objetos dotados de un proyecto* que a la vez representan en sus estructuras y cumplen con sus *performances* (tales como, por ejemplo, la creación de artefactos).

En vez de rehusar esta noción (como ciertos biólogos han intentado hacer), es por el contrario indispensable reconocerla como esencial a la definición misma de los seres vivos. Diremos que éstos se distinguen de todas las demás estructuras de todos los sistemas presentes en el universo por esta propiedad que llamaremos *teleonomía*.

Se notará sin embargo que esta condición, aunque necesaria para la definición de los seres vivos, no es suficiente ya que no propone criterios objetivos que permitan distinguir los seres vivientes de los artefactos, productos de su actividad.

No basta con señalar que el proyecto que da vida a un artefacto pertenece al animal que lo ha creado, y no al objeto artificial. Esta noción evidente es todavía demasiado subjetiva, y la prueba de ello es que sería difícil de utilizar en el programa de una calculadora: ¿cómo sabría que el proyecto de captar imágenes —proyecto representado por un aparato fotográfico— pertenece a un objeto aparte del aparato mismo? Por el solo examen de la estructura acabada y el análisis de sus *performances,* es posible identificar el proyecto, pero no su autor.

Para lograrlo, es preciso un programa que estudie no sólo el objeto actual, sino su origen, su historia y, para empezar, su modo de construcción. Nada se opone, al menos en principio, a que un programa así pueda ser formulado. Aunque incluso bastante primitivo, este programa permitiría discernir, entre un artefacto por perfeccionado que fuera y un ser vivo, una diferencia radical. La máquina no podría en efecto dejar de constatar que la estructura macroscópica de un artefacto (se trate de un panal, de una presa erigida por castores, de un hacha paleolítica, o de un vehículo espacial) es el resultado de la aplicación a los materiales que lo constituyen, de fuerzas *exteriores* al mismo objeto. La estructura macroscópica, una vez acabada, no atestigua las fuerzas de cohesión internas entre átomos o moléculas que constituyen el material (y no le confieren más que sus propiedades generales de densidad, dureza, ductilidad, etc.), sino las fuerzas *externas* que lo han *configurado.*

## *Máquinas que se construyen a sí mismas*

El programa, en contrapartida, deberá registrar el hecho de que la estructura de un ser vivo resulta de un proceso totalmente diferente en cuanto no debe casi nada a la acción de las fuerzas exteriores, y en cambio lo debe todo, desde la forma general al menor detalle, a interacciones «morfogenéticas» internas al mismo objeto. Estructura testimoniando pues un determinismo autónomo, preciso, riguroso, implicando una «libertad» casi total con respecto a los agentes o a las condiciones externas, capaces seguramente de trastornar este desarrollo, pero incapaces de diri-

girlo o de imponer al objeto viviente su organización. Por el carácter autónomo y espontáneo de los procesos morfogenéticos que construyen la estructura macroscópica de los seres vivos, étos se distinguen absolutamente de los artefactos, así como también de la mayoría de los objetos naturales, en los que la morfología macroscópica resulta en gran parte de la acción de agentes externos. Esto tiene una excepción: los cristales, cuya geometría característica refleja las interacciones microscópicas internas al mismo objeto. Por este criterio tan sólo, los cristales serían pues clasificados junto a los seres vivientes, mientras que artefactos y objetos naturales, configurados unos y otros por agentes externos, constituirían otra clase.

Que por este criterio, así como por el de la regularidad y el de la repetición, sean agrupadas las estructuras cristalinas y las de los seres vivos, podría hacerse meditar al programador, incluso ignorando la moderna biología: debería preguntarse si las fuerzas internas que confieren su estructura macroscópica a los seres vivos no serían de la misma naturaleza que las interacciones microscópicas responsables de las morfologías cristalinas. Ello es realmente así y constituye uno de los principales temas desarrollados en los siguientes capítulos del presente ensayo. Por el momento, buscamos definir por criterios absolutamente generales las propiedades macroscópicas que diferencian los seres vivos de todos los demás objetos del universo.

Habiendo «descubierto» que un determinismo interno, autónomo, asegura la formación de las estructuras extremadamente complejas de los seres vivientes, nuestro programador, ignorando la biología, pero experto en informática, debería ver necesariamente que tales estructuras representan una cantidad considerable de información de la que falta identificar la fuente: porque toda información expresada, o recibida, supone un emisor.

### *Máquinas que se reproducen*

Admitamos que, prosiguiendo su encuesta, haga en fin su último descubrimiento: que el emisor de la información expresada en la estructura de un ser vivo es *siempre* otro objeto idéntico al primero. Él ha identificado ahora la fuente y descubierto una tercera propiedad destacable de estos objetos: el poder de reproducir y transmitir *ne varietur* la información correspondiente a su propia estructura. Información muy rica, ya que describe una

organización excesivamente compleja, pero integralmente conservada de una generación a la otra. Designaremos esta propiedad con el nombre de *reproducción invariante*, o simplemente *invariancia*.

Se verá aquí que, por la propiedad de la reproducción invariante, los seres vivos y las estructuras cristalinas se encuentran una vez más asociadas y opuestas a los demás objetos conocidos del universo. Se sabe en efecto que ciertos cuerpos, en solución sobresaturada, no cristalizan, a menos que no se hayan inoculado a la solución gérmenes de cristales. Además, cuando se trata de un cuerpo capaz de cristalizar en dos sistemas diferentes, la estructura de los cristales que aparecerán en la solución será determinada por la de los gérmenes empleados. Sin embargo, las estructuras cristalinas representan una cantidad de información muy inferior a la que se transmite de generación en generación en los seres vivos más simples que conocemos. Este criterio, puramente cuantitativo, es necesario subrayarlo, permite distinguir a los seres vivientes de todos los otros objetos, entre los que no se incluyen los cristales.

* * *

Abandonamos ahora el programador marciano, sumido en sus reflexiones y supuesto ignorante de la biología. Esta experiencia imaginaria tenía por objeto el constreñirnos a «redescubrir» las propiedades más generales que caracterizan a los seres vivos y que los distinguen del resto del universo. Reconocemos ahora que sabemos la suficiente biología (suponiendo que hoy se la pueda conocer) para analizar de más cerca e intentar definir de forma más precisa, si es posible cuantitativa, las propiedades en cuestión. Hemos encontrado tres: teleonomía, morfogénesis autónoma, invariancia reproductiva.

### *Las propiedades extrañas: invariancia y teleonomía*

De estas tres propiedades, la *invariancia* reproductiva es la más fácil de definir cuantitativamente. Ya que se trata de la capacidad de reproducir una estructura de alto grado de orden, y ya que el grado de orden de una estructura puede definirse en unidades de información, diremos que el «contenido de invariancia» de una especie dada es igual a la cantidad de información

que, transmitida de una generación a otra, asegura la conservación de la norma estructural específica. Veremos que es posible, mediante ciertas hipótesis, llegar a una estimación de esta magnitud.

Supuesto que resultará más sencillo comprender más claramente la noción que se impone con la más inmediata evidencia por el examen de las estructuras y de las *performances* de los seres vivos: la de la teleonomía. Noción que, sin embargo, se revela al análisis profundamente ambigua, ya que implica la idea subjetiva de «proyecto». Recordemos el ejemplo del aparato fotográfico: si admitimos que la existencia de este objeto y su estructura realizan el «proyecto» de captar imágenes, debemos evidentemente admitir que un «proyecto» parecido se cumple en la emergencia del ojo de un vertebrado.

Mas todo proyecto particular, sea cual sea, no tiene sentido sino como parte de un proyecto más general. Todas las adaptaciones funcionales de los seres vivos como también todos los artefactos configurados por ellos cumplen proyectos particulares que es posible considerar como aspectos o fragmentos de un proyecto primitivo único, que es la conservación y la multiplicación de la especie.

Para ser más precisos, escogeremos arbitrariamente definir el proyecto teleonómico esencial como consistente en la transmisión, de una generación a otra, del contenido de invariancia característico de la especie. Todas las estructuras, todas las *performances*, todas las actividades que contribuyen al éxito del proyecto esencial serán llamadas «teleonómicas».

Esto permite proponer una definición de principio del «nivel» teleonómico de una especie. Se puede, en efecto, considerar que todas las estructuras y *performances* teleonómicas corresponden a una cierta cantidad de información que debe ser transferida para que estas estructuras sean realizadas y estas *performances* cumplidas. Llamemos a esta cantidad «la información teleonómica». Se puede entonces considerar que el «nivel teleonómico» de una especie dada corresponde a la cantidad de información que debe ser transferida, proporcionalmente, por individuo, para asegurar la transmisión a la generación siguiente del contenido específico de invariancia reproductiva.

Se verá fácilmente que el cumplimiento de un proyecto teleonómico fundamental (es decir, la reproducción invariante) pone en marcha, en diferentes especies y grados de la escala animal, estructuras y *performances* variadas, más o menos elaboradas y

complejas. Es preciso insistir sobre el hecho de que no se trata sólo de las actividades directametne ligadas a la reproducción propiamente dicha, sino de todas las que contribuyen, aunque sea muy indirectamente, a la sobrevivencia y a la multiplicación de la especie. El juego, por ejemplo, en los jóvenes de mamíferos superiores, es un elemento importante de desarrollo físico y de inserción social. Hay pues un valor teleonómico como participante en la cohesión del grupo, condición de su supervivencia y de la expansión de la especie. Es el grado de complejidad de todas estas estructuras o *performances,* concebidas para servir al proyecto teleonómico, lo que se trata de averiguar.

Esta magnitud teóricamente definible no es medible en la práctica. Permite al menos ordenar groseramente diferentes especies o grupos sobre una «escala teleonómica». Para tomar un ejemplo extremo, imaginemos un poeta enamorado y tímido que no osa declarar su amor a la mujer que ama y sólo sabe expresar simbólicamente su deseo en los poemas que le dedica. Supongamos que la dama, al fin seducida por estos refinados homenajes, consiente en hacer el amor con el poeta. Sus poemas habrán contribuido al éxito del proyecto esencial y la información que contenían debe pues ser contabilizada en la suma de las *performances* teleonómicas que aseguran la transmisión de la invariancia genética.

Está claro que el éxito del proyecto no comporta ninguna *performance* análoga en otras especies animales, en el ratón por ejemplo. Pero, y este punto es importante, el contenido de invariancia genética es casi el mismo en el ratón y en el hombre (y en todos los mamíferos). *Las dos magnitudes que hemos intentado definir son pues totalmente distintas.*

Esto nos conduce a considerar una cuestión muy importante que concierne a las relaciones entre las tres propiedades que hemos reconocido como características de los seres vivos: teleonomía, morfogénesis autónoma e invariancia. El hecho de que el programa utilizado las haya identificado sucesiva e independientemente no prueba que no sean simplemente tres manifestaciones de la misma y única propiedad fundamental y secreta, inaccesible a toda observación directa. Si éste fuera el caso, distinguir entre estas propiedades, buscar definiciones diferentes, podría ser ilusorio y arbitrario. Lejos de dar luz sobre los verdaderos problemas, de centrarse en el «secreto de la vida», de realmente disecarlo, no estaríamos más que exorcizándolo.

Es absolutamene verdadero que estas tres propiedades están

estrechamente asociadas en todos los seres vivientes. La invariancia genética no se expresa y no se revela más que a través y gracias a la morfogénesis autónoma de la estructura que constituye el aparato teleonómico.

Una primera observación se impone: el estatuto de estas tres nociones no es el mismo. Si la invariancia y la teleonomía son efectivamente «propiedades» características de los seres vivos, la estructuración espontánea debe más bien ser considerada como un mecanismo. Veremos además, en los capítulos siguientes, que este mecanismo interviene tanto en la reproducción de la información invariante como en la construcción de las estructuras teleonómicas.

Que este mecanismo en definitiva rinda cuenta de las dos propiedades no implica sin embargo que deban ser confundidas. Es posible, es de hecho metodológicamente indispensable, distinguirlas y esto por varias razones.

1. Se puede al menos *imaginar* objetos capaces de reproducción invariante, incluso desprovistos de todo aparato teleonómico. Las estructuras cristalinas pueden ser un ejemplo, a un nivel de complejidad muy inferior, por cierto, al de todos los seres vivos conocidos.

2. La distinción entre teleonomía e invariancia no es una simple abstracción lógica. Ella está justificada por consideraciones químicas. En efecto, de las dos clases de macromoléculas biológicas esenciales, una, la de las proteínas, es responsable de casi todas las estructuras y *performances* teleonómicas, mientras que la invariancia genética está ligada exclusivamente a la otra clase, la de los ácidos nucleicos.

3. Como se verá en el capítulo siguiente, esta distinción es, explícitamente o no, supuesta en todas las teorías, en todas las construcciones ideológicas (religiosas, científicas o metafísicas) relativas a la biosfera y a sus relaciones con el resto del universo.

* * *

Los seres vivos son objetos extraños. Los hombres, de todos los tiempos, han debido más o menos confusamente saberlo. El desarrollo de las ciencias de la naturaleza a partir del siglo XVII, su expansión a partir del siglo XIX, lejos de borrar esta impresión de extrañeza, la volvían aún más aguda. Respecto a las leyes físicas que rigen los sistemas macroscópicos, la misma existencia de los seres vivos parecía constituir una paradoja, violar ciertos

principios fundamentales sobre los que se basa la ciencia moderna. ¿Cuáles exactamente? Esto no parece aún resuelto. Se trata pues de analizar precisamente la naturaleza de esa o esas «paradojas». Ello nos dará la ocasión de precisar el estatuto, respecto a las leyes físicas, de las dos propiedades esenciales que caracterizan a los seres vivos: la invariancia reproductiva y la teleonomía.

### *La «paradoja» de la invariancia*

La invariancia parece, en efecto, desde el principio, constituir una propiedad profundamente paradójica, ya que la conservación, la reproducción, la multiplicación de las estructuras altamente ordenadas parecen incompatibles con el segundo principio de la termodinámica. Este principio impone, en efecto, que todo sistema macroscópico no puede evolucionar más que en el sentido de la degradación del orden que lo caracteriza.[3]

No obstante, esta predicción del segundo principio no es válida, y verificable, sino considerando la evolución de conjunto de un sistema *energéticamente aislado*. En el seno de un sistema así, en una de sus fases, se podrá observar la formación y el crecimiento de estructuras ordenadas sin que por tanto la evolución de conjunto del sistema deje de obedecer al segundo principio. El mejor ejemplo nos lo da la cristalización de una solución saturada. La termodinámica de tal sistema es bien conocida. El crecimiento local de orden que representa el ensamblaje de moléculas inicialmente desordenadas en una red cristalina perfectamente definida es «pagado» por una transferencia de energía térmica de la fase cristalina a la solución: la entropía (el desorden) del sistema en su conjunto aumenta en la cantidad prescrita por el segundo principio.

Este ejemplo muestra que un crecimiento local de orden, en el seno de un sistema aislado, es compatible con el segundo principio. Hemos subrayado, sin embargo, que el grado de orden que representa un organismo, incluso el más simple, es incomparablemente más elevado que el que define un cristal. Es preciso preguntarse si la conservación y la multiplicación invariante de tales estructuras es igualmente compatible con el segundo principio. Es posible verificarlo por una experiencia en gran modo comparable a la de la cristalización.

3. Ver Apéndice, pág. 180.

ninguna paradoja física en la reproducción invariante de estas estructuras: el precio termodinámico de la invariancia está pagado, lo más exactamente posible, gracias a la perfección del aparato teleonómico que, avaro de calorías, alcanza en su tarea infinitamente compleja un rendimiento raramente igualado por las máquinas humanas. Este aparato es enteramente lógico, maravillosamente racional, perfectamente adaptado a su proyecto: conservar y reproducir la norma estructural. Y ello, no transgrediendo, sino explotando las leyes físicas en beneficio exclusivo de su idiosincrasia personal. Es la existencia misma de este proyecto, a la vez cumplido y proseguido por el aparato teleonómico, lo que constituye el «milagro». ¿Milagro? No, la verdadera cuestión se plantea a otro nivel, más profundo, que el de las leyes físicas; es de nuestro entendimiento, de la intuición que tenemos del fenómeno de lo que se trata. No hay en verdad paradoja o milagro; simplemente una flagrante *contradicción* epistemológica.

La piedra angular del método científico es el postulado de la objetividad de la Naturaleza. Es decir, la negativa *sistemática* de considerar capaz de conducir a un conocimiento «verdadero» toda interpretación de los fenómenos dada en términos de causas finales, es decir de «proyecto». Se puede datar exactamente el descubrimiento de este principio. La formulación, por Galileo y Descartes, del principio de inercia, no fundaba sólo la mecánica, sino la epistemología de la ciencia moderna, aboliendo la física y la cosmología de Aristóteles. Cierto; ni la razón, ni la lógica, ni la experiencia, ni incluso la idea de su confrontación sistemática habían faltado a los predecesores de Descartes. Pero la ciencia, tal como la entendemos hoy, no podía constituirse sobre estas únicas bases. Le faltaba todavía la austera censura planteada por el postulado de objetividad. Postulado puro, por siempre indemostrable, porque evidentemente es imposible imaginar una experiencia que pudiera probar la *no existencia* de un proyecto, de un fin perseguido, en cualquier parte de la naturaleza.

Mas el postulado de objetividad es consustancial a la ciencia, ha guiado todo su prodigioso desarrollo desde hace tres siglos. Es imposible desembarazarse de él, aunque sólo sea provisionalmente, o en un ámbito limitado, sin salir del de la misma ciencia.

La objetividad, sin embargo, nos obliga a reconocer el carácter teleonómico de los seres vivos, a admitir que en sus estructuras y *performances* realizan y prosiguen un proyecto. Hay pues allí, al menos en apariencia, una contradicción epistemológica

profunda. El problema central de la biología es esta contradicción, que se trata de resolver si es que no es más que aparente, o de declararla radicalmente insoluble si así verdaderamente resulta ser.

# 2

# Vitalismos y animismos

*La relación de prioridad entre invariancia y teleonomía: dilema fundamental*

De la misma manera que las propiedades teleonómicas de los seres vivos parecen someter a discusión uno de los postulados de base de la teoría moderna del conocimiento, toda concepción del mundo, filosófica, religiosa, científica, supone *necesariamente* una solución, implícita o no, de este problema. Toda solución, a su vez, sea cual sea además la motivación, implica de forma igualmente inevitable una hipótesis en cuanto a la prioridad, causal y temporal, de las dos propiedades características de los seres vivientes (invariancia y teleonomía), la una respecto de la otra.

Reservamos para un capítulo ulterior la exposición y las justificaciones de la hipótesis considerada como única aceptable a los ojos de la ciencia moderna: que la invariancia precede necesariamente la teleonomía. O, para ser más explícitos, la idea darwiniana de que la aparición, la evolución, el refinamiento progresivo de estructuras cada vez más intensamente teleonómicas, es debido a perturbaciones sobrevenidas a una estructura *poseyendo ya la propiedad de invariancia,* capaz por consecuencia de «conservar el azar» y por ello de someter los efectos al juego de la selección natural.

Evidentemente, la teoría que aquí esbozo, breve y dogmáticamente, no es la del mismo Darwin, quien no podía, en su tiempo, tener idea de los mecanismos químicos de la invariancia reproductiva, ni de la naturaleza de las perturbaciones que estos

mecanismos sufren. Mas con ello no se pretende quitar importancia a la obra de Darwin sino constatar que la teoría selectiva de la evolución no ha podido tener su completo sentido, toda su precisión y certidumbre, hasta después, por lo menos, de una veintena de años.

Hasta el presente, la teoría selectiva es la única propuesta que, haciendo de la teleonomía una propiedad secundaria, derivada de la invariancia considerada como única primitiva, sea compatible con el postulado de objetividad. Es igualmente la única en ser no sólo compatible con la física moderna sino en estar fundamentada en ella, sin restricciones ni adiciones. Es la teoría de la evolución selectiva la que en definitiva asegura la coherencia epistemológica de la biología y le da un lugar entre las ciencias de la «Naturaleza objetiva». Poderoso argumento ciertamente en favor de la teoría, pero que no bastaría para justificarla.

Todas las demás concepciones que han sido explícitamente propuestas para rendir cuenta de la rareza de los seres vivientes, o que están implícitamente arropadas por las ideologías religiosas y la mayoría de los grandes sistemas filosóficos, suponen la hipótesis inversa: que la *invariancia es protegida, la ontogenia guiada, la evolución orientada* por un principio teleonómico inicial, del que todos esos fenómenos serían manifestaciones. En el resto de este capítulo analizaré esquemáticamente la lógica de estas interpretaciones, muy diversas, en apariencia, pero que implican el abandono, parcial o total, declarado o no, consciente o no, del postulado de objetividad. Resultará cómodo, para ello, adoptar una clasificación (algo arbitraria, es cierto) de estas concepciones, según la naturaleza y extensión supuesta del principio teleonómico que les corresponda.

Se puede así definir por una parte un primer grupo de teorías que admiten un principio teleonómico que opera exclusivamente en el seno de la biosfera, de la «materia viviente». Estas teorías, que llamaré *vitalistas*, implican pues una distinción radical entre los seres vivos y el universo inanimado.

Se puede agrupar por otro lado las condiciones que hacen referencia a un principio teleonómico *universal*, responsable de la evolución cósmica y también de la de la biosfera, en cuyo seno se expresaría solamente de modo más preciso e intenso. Estas teorías ven a los seres vivos como los productos más elaborados, más perfectos, de una evolución universalmente orientada que ha desembocado, porque *debía* hacerlo, en el hombre y

en la humanidad. Estas concepciones que llamaré «animistas» son bajo muchos puntos de vista más interesantes que las teorías vitalistas a las que no consagraré más que un breve resumen.[1]

### *Vitalismo metafísico*

Entre las teorías vitalistas, se pueden discernir tendencias muy diversas. Nos contentaremos aquí con distinguir entre lo que llamaremos el «vitalismo metafísico» y el «vitalismo cientista».

El más ilustre promotor del vitalismo metafísico ha sido, sin duda, Bergson. Es sabido que gracias a un estilo seductor, a una dialéctica metafórica desprovista de lógica mas no de poesía, esta filosofía conoció un inmenso éxito. Hoy parece haber caído en un casi total descrédito, pero antes, en mi juventud, no se podía esperar tener éxito en el bachillerato sin haber leído *La evolución creadora.* Es preciso anotar que esta filosofía se basa totalmente en cierta idea de la vida concebida como un «impulso», una «corriente» radicalmente distinta de la materia inanimada, pero luchando con ella, *dificultándola* para obligarla a organizarse. Contrariamente a casi todos los demás vitalismos o animismos, el de Bergson no es finalista. Rehúsa encerrar la espontaneidad esencial de la vida en una determinación cualquiera. La evolución, que se identifica al impulso vital, no puede tener ni causas finales ni causas eficientes. El hombre es el estado supremo al que la evolución ha llegado, pero sin haberlo buscado o previsto. Es más bien la manifestación y la prueba de la total libertad del impulso creador.

A esta concepción está asociada otra, considerada por Bergson como fundamental: la inteligencia racional es un instrumento de conocimiento especialmente adaptado para el dominio de la materia inerte, pero totalmente incapaz de aprehender los fenómenos de la vida. Sólo el instinto, consustancial al impulso vital, puede dar una intuición directa, global. Todo discurso analítico y racional sobre la vida está pues desprovisto de sentido, o más bien fuera de lugar. El alto desarrollo de la inteligencia racional en el *Homo sapiens,* ha llevado consigo un grave y lamentable

1. Quizás haga falta subrayar que empleo aquí los calificativos «animista» y «vitalista» con una acepción particular, algo diferente del uso corriente.

empobrecimiento de sus poderes de intuición, de los que hoy hemos de intentar recobrar sus riquezas.

No intentaré discutir (no se presta, además) esta filosofía. Encerrado en la lógica y pobre en intuiciones globales, me siento incapaz de hacerlo. Por lo tanto no considero la actitud de Bergson como insignificante, sino todo lo contrario. La revuelta, consciente o no, contra lo racional, el respeto concedido al *Id* a expensas del *Ego* son signos de nuestro tiempo (sin hablar de la espontaneidad creadora). Si Bergson hubiese empleado un lenguaje menos claro, un estilo más «profundo», aún se leería.[2]

### *Vitalismo cientista*

Los vitalistas «científicos» han sido numerosos y entre ellos se encuentran sabios muy considerados. Pero, mientras hace unos cincuenta años los vitalistas se reclutaban entre los biólogos (de los que el más conocido, Driesch, abandonó la embriología por la filosofía), los contemporáneos proceden principalmente de las ciencias físicas, como M. Elsässer y M. Polany. Es comprensible, ciertamente, que los físicos hayan sido atraídos, más aún que los biólogos, por la rareza de los seres vivos. Esquemáticamente resumida, la actitud de M. Elsässer, por ejemplo, es la siguiente:

Sin duda las extrañas propiedades, invariancia y teleomonía, no violan la física, pero *no son enteramente explicables* con la ayuda de las fuerzas físicas e interacciones químicas reveladas por el estudio de los sistemas no vivientes. Es pues indispensable admitir que unos principios que vendrían a *añadirse* a los de la física, operan en la materia viva mas no en los sistemas no vivientes donde, por consiguiente, estos principios electivamente vitales no podían ser descubiertos. Son estos principios (o leyes biotónicas, empleando la terminología de Elsässer) los que se tratan de elucidar.

El gran Niels Bohr no descartaba, parece, tales hipótesis.

2. El pensamiento de Bergson no carece, desde luego, de oscuridades y contradicciones aparentes. Parece que se pueda negar, por ejemplo, que el dualismo bergsoniano sea esencial: ¿quizás haga falta considerarlo como derivado de un monismo más primitivo? (C. Blanchard, comunicación personal). Quede claro que no pienso aquí ponerme a analizar el pensamiento de Bergson en sus ramificaciones, sino sólo en sus implicaciones más directamente concernientes a la teoría de los sistemas vivientes.

Pero no pretendía aportar la prueba que confirmara que fuesen necesarios. ¿Lo son? En definitiva, éste es el problema. Es lo que afirman particularmente Elsässer y Polany. Lo mínimo que se puede decir es que la argumentación de estos físicos carece singularmente de rigor y firmeza.

Estos argumentos conciernen respectivamente a cada una de las propiedades extrañas. En lo que concierne a la invariancia, el mecanismo es hoy en día lo bastante bien conocido para que se pueda afirmar que ningún principio no físico es necesario para su interpretación (cf. capítulo VI).

Queda la teleonomía, o más exactamente los mecanismos morfogenéticos que construyen las estructuras teleonómicas. Es completamente cierto que el desarrollo embrionario es uno de los fenómenos más milagrosos aparentemente de toda la biología. Es cierto también que estos fenómenos, admirablemente descritos por los embriólogos, escapan aún, en gran parte (por razones técnicas), al análisis genético y bioquímico que sólo, evidentemente, podrían rendir cuenta. La actitud de los vitalistas considerando que las leyes físicas son o resultarán, en todo caso, insuficientes para explicar la embriogénesis, no se basa pues en conocimientos precisos, en observaciones acabadas, sino solamente en nuestra actual ignorancia.

Por el contrario, nuestros conocimientos relativos a los mecanismos cibernéticos moleculares que regulan la actividad y el crecimiento celulares, han hecho progresos considerables y contribuirán sin duda en un próximo futuro a la interpretación del desarrollo. Reservamos para el capítulo IV la discusión de estos mecanismos, lo que nos dará la ocasión de volver sobre ciertos argumentos vitalistas. El vitalismo necesita, para sobrevivir, que subsistan en biología, si no verdaderas paradojas, al menos algunos «misterios». Los avances de estos últimos veinte años en biología molecular han reducido singularmente el ámbito de estos misterios, dejando sólo abierto a las especulaciones vitalistas el campo de la subjetividad: el de la conciencia. No se corre gran riesgo al prever que, en este dominio por el momento aún «reservado», estas especulaciones resultarán tan estériles como en todos donde han actuado hasta el presente.

*La «proyección animista» y la «antigua alianza»*

Referidas a la infancia de la humanidad, anteriores quizás a la aparición del *Homo sapiens*, las concepciones animistas tienen aún profundas y vivaces raíces en el alma del hombre moderno.

Nuestros antepasados no podían, sin duda, más que percibir confusamente la extrañeza de su condición. No tenían las razones que hoy tenemos para sentirse extraños al universo en el que abrían los ojos. ¿Qué veían primeramente? Animales, plantas; seres en los que de golpe podían adivinar una naturaleza parecida a la suya. Las plantas crecen, buscan el sol, mueren; los animales cazan su presa, atacan a sus enemigos, alimentan y defienden a su prole; los machos se baten por la posesión de una hembra. Plantas, animales, como el mismo hombre, se explicaban fácilmente: estos seres tienen un proyecto que es el de vivir y sobrevivir en su descendencia, aunque el precio sea la muerte. El proyecto explica el ser y el ser no tiene sentido más que por su proyecto.

Pero alrededor de ellos nuestros antepasados veían también otros objetos sumamente misteriosos: rocas, ríos, montañas, tormentas, lluvias, cuerpos celestes. Estos objetos, si existían, era preciso que fuese también por un proyecto, y que tuviesen un alma para alimentarlo. Así se resolvía para estos hombres la extrañeza del universo: no existen, en realidad, objetos inanimados, esto sería incomprensible. En el seno del río, en la cima de la montaña, almas más secretas alimentaban proyectos más vastos y más impenetrables que aquéllos, transparentes, de los hombres o de los animales. Así nuestros antepasados sabían ver en las formas y los acontecimientos de la naturaleza la acción de fuerzas benévolas u hostiles, pero nunca indiferentes, nunca totalmente extrañas.

El paso esencial del animismo (tal como creo definirlo aquí) consiste en una proyección a la naturaleza inanimada, de la conciencia que posee el hombre del funcionamiento intensamente teleonómico de su propio sistema nervioso central. Es, en otros términos, la hipótesis de que los fenómenos naturales pueden y deben explicarse en definitiva de la misma manera, por las mismas «leyes», que la actividad humana subjetiva, consciente y proyectiva. El animismo primitivo formulaba esta hipótesis con toda ingenuidad, franqueza y precisión, poblando así la naturaleza de graciosos o temibles mitos que, durante siglos, han alimentado el arte y la poesía.

Sería equivocado sonreír, incluso con la ternura y el respeto que inspira la niñez. ¿Creemos acaso que la cultura moderna ha renunciado verdaderamente a la interpretación subjetiva de la naturaleza? El animismo establecía entre la Naturaleza y el Hombre una profunda alianza fuera de la cual no se extiende más que una horrible soledad. ¿Hace falta romper esta ligadura porque el postulado de objetividad se impone? La historia de las ideas desde el siglo XVII atestigua los esfuerzos prodigados por los más grandes espíritus para evitar la ruptura, para forjar de nuevo el anillo de «la antigua alianza». Piénsese en las grandes tentativas como la de Leibniz, o en el enorme y grave monumento levantado por Hegel. Pero el idealismo está lejos de haber sido el único refugio de un animismo cósmico. En el mismo núcleo de ciertas ideologías, que dicen y quieren estar fundadas sobre la ciencia, se encuentra, bajo una forma más o menos velada, la proyección animista.

*El progresismo cientista*

La filosofía biológica de Teilhard de Chardin no merecería detenerse en ella, a no ser por el sorprendente éxito que ha encontrado hasta en los medios científicos. Éxito que testimonia la angustia, la necesidad de renovar la alianza. Teilhard la renueva en efecto sin rodeos. Su filosofía, como la de Bergson, está enteramente fundada sobre un postulado evolucionista inicial. Pero, contrariamente a Bergson, admite que la fuerza evolutiva opera en el universo entero, de las partículas elementales a las galaxias; no hay materia «inerte», y por lo tanto ninguna distinción de esencia entre materia y vida. El deseo de presentar esta concepción como «científica», lleva a Teilhard a fundamentarla sobre una definición nueva de la energía. Ésta estaría de algún modo distribuida según dos vectores, uno sería (supongo) la energía «ordinaria» mientras que el otro correspondería a la fuerza de ascendencia evolutiva. La biosfera y el hombre son los productos actuales de esta ascendencia a lo largo del vector espiritual de la energía. Esta evolución debe continuar hasta que toda la energía sea concentrada según este vector: es el punto ω.

Aunque la lógica de Teilhard sea incierta y su estilo laborioso, algunos, incluso no aceptando enteramente su ideología, reconocen una cierta grandeza poética. Por mi parte estoy sorprendido por la falta de rigor y de austeridad intelectual de esta

filosofía. Veo, sobre todo, una sistemática complacencia en querer conciliar, transigir a cualquier precio. Quizá, después de todo, Teilhard no deja de ser miembro de una orden de la que, tres siglos antes, Pascal atacaba el laxismo teológico.

La idea de reencontrar la antigua alianza animista con la naturaleza, o de fundar una nueva, gracias a una teoría universal según la cual la evolución de la biosfera hasta el hombre estaría en la continuidad sin ruptura de la evolución cósmica, no ha sido, desde luego, descubierta por Teilhard. Es, en realidad, la idea central del progresismo cientista del siglo XIX. Se la encuentra en el centro del positivismo de Spencer y del materialismo dialéctico de Marx y Engels. La fuerza desconocida e *incognoscible* que, según Spencer, opera en todo el universo para crear variedad, coherencia, especialización, orden, juega exactamente el mismo papel, en definitiva, que la energía «ascendente» de Teilhard: la historia humana prolonga la evolución biológica, que forma parte de la evolución cósmica. Gracias a este principio único, el hombre encuentra al fin en el universo su lugar eminente y necesario, con la certidumbre del progreso al cual está siempre entregado.

La fuerza diferenciante de Spencer (como la energía ascendente de Teilhard) representa evidentemente la proyección animista. Para dar un sentido a la naturaleza, para que el hombre no esté separado por un insondable abismo, para volverla en fin descifrable e inteligente, era preciso darle un proyecto. A falta de un alma que alimente este proyecto, se inserta entonces en la naturaleza una «fuerza» evolutiva, ascendente, de lo que resulta de hecho el abandono del postulado de objetividad.

### *La proyección animista en el materialismo dialéctico*

Entre las ideologías cientistas del siglo XIX, la más poderosa, la que aún en nuestros días ejerce una profunda influencia, mucho más allá del círculo sin embargo vasto de sus adeptos, es evidentemente el marxismo. Así es particularmente revelador el constatar que, queriendo fundar sobre las leyes de la misma naturaleza el edificio de sus doctrinas sociales, Marx y Engels hayan recurrido, ellos también, pero mucho más clara y deliberadamente que Spencer, a la «proyección animista».

Me parece, en efecto, imposible interpretar de otro modo la

famosa «inversión» por la cual Marx sustituye el materialismo dialéctico a la dialéctica idealista de Hegel.

El postulado de Hegel: que las leyes más generales que gobiernan el universo en su evolución son de orden dialéctico, tiene valor en el seno de un sistema que no reconoce como realidad permanente y auténtica más que al espíritu. Si todos los acontecimientos, todos los fenómenos, no son más que manifestaciones parciales de una idea que se piensa, es legítimo buscar en la experiencia subjetiva del movimiento del pensamiento la expresión más inmediata de las leyes universales, y ya que el pensamiento procede dialécticamente, está claro que las «leyes de la dialéctica» gobiernan la naturaleza entera. Pero conservar intactas estas «leyes» subjetivas, para hacer de ellas las de un universo puramente material, es efectuar la proyección animista con toda claridad, con todas sus consecuencias, comenzando por el abandono del postulado de objetividad.

Ni Marx, ni Engels han analizado con detalle, para intentar justificarla, la lógica de esta inversión de la dialéctica. Pero a partir de los numerosos ejemplos de aplicación que da particularmente Engels (en el *Anti-Dühring* y en la *Dialéctica de la Naturaleza*), se puede intentar reconstruir el pensamiento profundo de los fundadores del materialismo dialéctico. Las articulaciones esenciales serían las siguientes:

1. El modo de existencia de la materia es el movimiento.
2. El universo, definido como la totalidad de la materia, única existente, está en un estado de perpetua evolución.
3. Todo conocimiento verdadero del universo contribuye a la inteligencia de esta evolución.
4. Pero este conocimiento no es obtenido más que en la interacción, evolutiva y causa de evolución, entre el hombre y la materia (o más exactamente el «resto» de la materia). Todo conocimiento verdadero es pues «práctico».
5. La conciencia corresponde a esta interacción cognitiva. El pensamiento consciente refleja por consecuencia el movimiento del mismo universo.
6. Ya que, por lo tanto, el pensamiento es parte y reflejo del movimiento universal, y ya que su movimiento es dialéctico, es preciso que la ley de evolución del universo sea dialéctica. Lo que explica y justifica el empleo de términos como contradicción, afirmación, negación, a propósito de fenómenos naturales.
7. La dialéctica es constructiva (gracias especialmente a la

tercera «ley»). La evolución del universo es pues ascendente y constructiva. Su más alta expresión es la sociedad humana, la conciencia, el pensamiento, productos necesarios de esta evolución.

8. Por el nuevo enfoque de la esencia evolutiva de las estructuras del universo, el materialismo dialéctico aventaja radicalmente al materialismo del siglo XVIII que, fundado sobre la lógica clásica, no sabía reconocer más que interacciones mecánicas entre objetos supuestos invariantes y permanecía incapaz de pensar la evolución.

Se puede seguramente contestar esta reconstitución, negar que corresponde al pensamiento auténtico de Marx y Engels. Pero esto es, en resumen, secundario. La influencia de una ideología reside en la significación que permanece en el espíritu de sus adeptos y la que de ella dan los epígonos. Innumerables textos prueban que la reconstitución propuesta es legítima, como representando al menos la «vulgata» del materialismo dialéctico. No citaré más que un texto, muy significativo en cuanto su autor era un ilustre biólogo moderno, J. B. S. Haldane. Escribe en su prefacio a la traducción inglesa de la *Dialéctica de la Naturaleza:*

«El marxismo considera la ciencia bajo dos aspectos. En primer lugar, los marxistas estudian la ciencia entre las otras actividades humanas. Muestran cómo la actividad científica de una sociedad depende de la evolución de sus necesidades, o sea de sus métodos de producción que la ciencia a su vez modifica, así como la evolución de sus necesidades. Pero, en segundo lugar, Marx y Engels no se limitaban a analizar las modificaciones de la sociedad. En la Dialéctica, descubren las leyes generales del cambio, no sólo en la sociedad y en el pensamiento humano, sino en el mundo exterior, *proyectado por el pensamiento humano.* Lo que viene a decir que la dialéctica puede ser aplicada a problemas de ciencia "pura" tanto como a las relaciones sociales de la ciencia.»

El mundo exterior «reflejado por el pensamiento humano»: todo reside en eso, en efecto. La lógica de la inversión exige evidentemente que este reflejo sea mucho mayor que una transposición más o menos fiel del mundo exterior. Es indispensable, para el materialismo dialéctico, que el «Ding an sich», la cosa o el fenómeno en sí, llegue hasta el nivel de la conciencia sin alteración ni empobrecimiento, sin que ninguna selección haya operado entre sus propiedades. Es preciso que el mundo exterior esté

literalmente presente en la conciencia de la integridad total de sus estructuras y de su movimiento.[3]

A esta concepción se podrían oponer sin duda ciertos textos del mismo Marx. Aunque esto no quite para considerarla indispensable a la coherencia lógica del materialismo dialéctico, como los epígonos, e incluso los mismos Marx y Engels, han reconocido. No olvidemos, además, que el materialismo dialéctico es una adición relativamente tardía al edificio socio-económico ya erigido por Marx. Adición claramente destinada a hacer del materialismo histórico una «ciencia» fundamentada sobre las leyes de la naturaleza.

## *Necesidad de una epistemología crítica*

La radical exigencia del «espejo perfecto» explica el encarnizamiento de los dialécticos materialistas en repudiar cualquier clase de epistemología crítica que será en adelante inmediatamente calificada de «idealista» y de «kantiana». Se puede seguramente comprender, en cierta medida, esta actitud, de los hombres del siglo XIX, contemporáneos de la primera gran explosión científica. Puede muy bien parecer entonces que el hombre, gracias a la ciencia, estuvo dispuesto a apoderarse directamente de la naturaleza, de apropiarse la substancia misma. Nadie, por ejemplo, dudaba que la gravitación fuera una ley de la misma naturaleza, capturada en su intimidad profunda.

Como se sabe, era por un retorno a las fuentes, a las mismas fuentes del conocimiento, que la segunda etapa de la ciencia, la del siglo XX, debía surgir. Desde el fin del siglo XIX, la necesidad absoluta de una epistemología crítica se vuelve evidente como

3. Citemos también el siguiente texto de Henri Lefebvre (*Le matérialisme dialectique.* PUF, París, 1949, p. 92): «La dialéctica, lejos de ser un movimiento interior del espíritu, es real, antes que en el espíritu, en el ser. Ella se impone al espíritu. Analicemos primeramente el movimiento más simple y más abstracto: el del pensamiento más desnudo. Descubriremos así las categorías más generales y su encadenamiento. Nos es preciso luego ligar este movimiento al movimiento concreto, al *contenido dado:* tomamos conciencia entonces del hecho de que el movimiento del contenido y del ser se elucida para nosotros en las leyes dialécticas. Las contradicciones en el pensamiento no vienen solamente del pensamiento, de su impotencia o de su incoherencia definitivas, vienen también del contenido. Su encadenamiento tiende hacia la expresión del *movimiento total del contenido* y lo eleva al nivel de la conciencia y de la reflexión.»

condición misma de la objetividad del conocimiento. No son en adelante los filósofos los únicos que se libran a esta crítica, sino también los hombres de ciencia los que son llevados a incorporarla en la misma trama teórica. Es gracias a esta condición que pueden desarrollarse la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica.

Por otra parte, el progreso de la neurofisiología y de la psicología experimental comienzan a revelarnos al menos algunos de los aspectos del funcionamiento del sistema nervioso. Lo bastante para que sea evidente que el sistema nervioso central no puede, y sin duda no debe, expedir a la conciencia más que una información codificada, transpuesta, encuadrada en unas normas preestablecidas: es decir asimilada y no simplemente restituida.

## *Quiebra epistemológica del materialismo dialéctico*

La tesis del reflejo puro, del espejo perfecto que no invertiría incluso la imagen, nos parece pues hoy en día más insostenible que nunca. Pero a decir verdad no era necesario esperar los adelantos de la ciencia del siglo XX para ver aparecer las confusiones y contra-sentidos a los que esta ciencia no podía dejar de conducir. Para iluminar la linterna del pobre Dühring que ya los denunciaba, el mismo Engels propone numerosos ejemplos de la interpretación dialéctica de los fenómenos naturales. Citemos el célebre ejemplo del grano de cebada dado como ilustración de la tercera ley: «Si un grano de cebada encuentra las condiciones que le son normales, se opera en él una transformación específica y, bajo la influencia del calor y de la humedad, germina: el grano desaparece como grano, es negado, reemplazado por la planta nacida de él, negación del grano. ¿Mas cuál es la carrera normal de esta planta? Crece, florece, se fecunda y produce nuevos granos de cebada, y tan pronto como han madurado, el tallo se debilita, la planta se niega por su parte. Como resultado de esta negación de la negación, tenemos de nuevo el grano de cebada del principio, no único, sino en número de diez, veinte, treinta...»

«Ocurre lo mismo, añade Engels un poco más adelante, en matemáticas: tomemos una magnitud algebraica cualquiera, por ejemplo a. Neguémosla, tenemos $-a$. Neguemos esta negación multiplicando $-a$ por $-a$, tenemos $a^2$; es decir la magnitud positiva primitiva, pero de un grado superior...», etc.

Estos ejemplos ilustran sobre todo la amplitud del desastre epistemológico que resulta de la utilización «científica» de las interpretaciones dialécticas. Los dialécticos materialistas modernos evitan en general caer en parecidas tonterías. Pero hacer de la contradicción dialéctica la «ley fundamental» de todo movimiento, de toda evolución, no deja de ser un intento de sistematizar, en nombre de la Dialéctica, dos de los más grandes descubrimientos de su tiempo: el segundo principio de la termodinámica volverla, en fin, descifrable, y moralmente significante. Es la «proyección animista», siempre reconocible, sean cuales sean los disfraces.

Interpretación no sólo extraña a la ciencia, sino incompatible con ella, así ha resultado cada vez que los dialécticos materialistas, saliendo de la pura verborrea «teórica», han querido esclarecer las vías de la ciencia experimental con la ayuda de sus concepciones. El mismo Engels (que sin embargo tenía de la ciencia de su tiempo un profundo conocimiento) había llegado a rechazar, en nombre de la Dialectica, dos de los más grandes descubrimientos de su tiempo: el segundo principio de la termodinámica y (pese a su admiración por Darwin) la interpretación puramente selectiva de la evolución. Esto en virtud de los mismos principios por los que Lenin atacaba, y con qué violencia, la epistemología de Mach; con que Jdanov más tarde ordenaba a los filósofos rusos combatir «a las diabluras kantianas de la escuela de Copenhague», y por los que Lyssenko acusaba a los genetistas de sostener una teoría radicalmente incompatible con el materialismo dialéctico, o sea necesariamente falsa. Pese a las denegaciones de los genetistas rusos, Lyssenko tenía razón. La teoría del gen como determinante hereditaria invariante a través de las generaciones, e incluso de las hibridaciones, es en efecto totalmente inconciliable con los principios dialécticos. Es por definición una teoría idealista, puesto que reposa sobre un postulado de invariancia. El hecho de que se conozca hoy en día la estructura del gen y el mecanismo de su reproducción invariante no cambia nada, porque la descripción que da la biología moderna es puramente mecanística. Se trata pues aún, de una concepción relevante del «materialismo vulgar», mecanicista, y por consecuencia «objetivamente idealista», como lo anotó Althusser en su severo comentario de mi Lección inaugural en el Collège de France.

* * *

He pasado revista brevemente, y muy incompletamente, a diversas ideologías o teorías. Se puede pensar que doy de ellas una imagen deformada, por ser parcial. Intentaré justificarme subrayando que en realidad no buscaba más que destacar lo que estas concepciones admiten, o implican, en lo concerniente a la biología y, más especialmente, la relación que suponen entre invariancia y teleonomía. Se ha visto que todas, sin excepción, hacen de un principio teleonómico inicial el motor de la evolución, sea de la biosfera sola, sea del universo entero. A los ojos de la teoría científica moderna todas estas concepciones son erróneas, y esto no solamente por razones de hecho, que serán discutidas concretamente en el capítulo VI.

### *La ilusión antropocentrista*

En la base de estos errores hay con toda seguridad la ilusión antropocentrista. La teoría heliocéntrica, la noción de inercia, el principio de objetividad, no podían bastar para disipar este antiguo espejismo. La teoría de la evolución, en vez de hacer desaparecer la ilusión, parecía conferirle una nueva realidad haciendo del hombre no el centro, sino el heredero por siempre esperado, natural, del universo entero. Dios, en fin, podía morir, reemplazado por este nuevo y grandioso espejismo. En adelante el último designio de la Ciencia será formular una teoría unificada que, fundada sobre un corto número de principios, darán cuenta de la realidad entera, comprendida la biosfera y el hombre. Es en esta certidumbre exaltante donde se nutre el progresismo cientista del siglo XIX. Teoría unificada que los dialécticos materialistas creían haber ya formulado.

Porque le parecía atentar a la certidumbre de que el hombre y el pensamiento humano son los productos necesarios de una ascendencia cósmica, Engels negó formalmente el segundo principio. Es significativo que lo haga desde la introducción de la *Dialéctica de la Naturaleza* y que asocie directamente este tema a una predicación cosmológica apasionada por la que promete si no a la especie humana, al menos al «cerebro pensante», un eterno retorno. Retorno, en efecto, a uno de los más antiguos mitos de la humanidad.[4]

4. «Llegamos pues a la conclusión de que, de una forma que pertenece-

## *La biosfera: acontecimiento singular no deducible de los primeros principios*

Fue preciso esperar a la segunda mitad del siglo XX para que el nuevo espejismo antropocentrista, incluido en la teoría de la evolución, se desvaneciese. Hoy podemos, creo, afirmar que una teoría universal, por completos que fueran sus éxitos en todos sus puntos, no podría nunca contener a la biosfera, a su estructura, a su evolución como fenómenos *deducibles* de los primeros principios.

Esta proposición puede parecer oscura. Busquemos una aclaración. Una teoría universal debería evidentemente contener, a la vez, a la relatividad, a la teoría cuántica, a una teoría de las partículas elementales. Siempre que ciertas condiciones iniciales pudieran ser formuladas, contendría igualmente una cosmología que prevería la evolución general del Universo. Sabemos sin embargo que (contrariamente a lo que creía Laplace, y, después de él, la ciencia y la filosofía «materialista» del siglo XIX) estas previsiones no podrían ser más que estadísticas. La teoría contendría, sin duda, la clasificación periódica de los elementos, pero no podría determinar más que la probabilidad de existencia de cada uno de ellos. Del mismo modo prevería la aparición de objetos tales como las galaxias o los sistemas planetarios, pero

---

rá a los sabios del futuro darle luz, el calor irradiado en el espacio debe necesariamente tener la posibilidad de convertirse en otra forma de movimiento, bajo la cual pueda de nuevo concentrarse y volver a ser activa. Así cae la dificultad esencial que se oponía a la reconversión de soles muertos en nebulosas incandescentes. (...)

»Pero, sea cual sea la frecuencia y el inexorable rigor con los que este ciclo se cumpla en el tiempo y en el espacio: sea cual sea el número de millones de soles y de tierras que nazcan y perezcan; por mucho que sea el tiempo que se necesite para que, en un sistema solar, las condiciones de vida orgánica se establezcan, aunque sólo sea en un planeta; por innumerables seres orgánicos que deban, en primer lugar, aparecer y perecer antes que salga de su seno un animal con un cerebro capaz de pensar y que encuentre por un corto lapso de tiempo las condiciones propias para la vida, para ser luego exterminado también sin piedad; tenemos la certeza que, en todas estas transformaciones, la materia permanece eternamente siendo la misma, que ninguno de sus atributos puede jamás perderse y que, en consecuencia, si ella debe en la Tierra exterminarse algún día, como exigencia de una necesidad superior, su floración suprema, el espíritu pensante, es preciso que por esa misma necesidad en otra parte y en otra hora sea reproducido.» Engels, *Dialéctica de la Naturaleza.*

no podría en ningún caso deducir de sus principios la existencia necesaria de tales objetos, de tal acontecimiento, de tal fenómeno particular, trátese de la nebulosa de Andrómeda, del planeta Venus, del monte Everest o de la tormenta de ayer por la tarde. De una manera general, la teoría prevería la existencia, las propiedades, las relaciones de ciertas *clases* de objetos o de acontecimientos, pero no podría evidentemente prever la existencia, ni los caracteres distintivos de ningún objeto, de ningún acontecimiento *particular.*

La tesis que aquí presentaré es que la biosfera no contiene una clase previsible de objetos o de fenómenos, sino que constituye un acontecimiento particular, compatible seguramente con los primeros principios, pero *no deducible* de estos principios. Por lo tanto, esencialmente imprevisible.

Espero que se me comprenda bien. Diciendo que los seres vivos, en cuanto clase, no son previsibles a partir de los primeros principios, no pretendo en ningún modo sugerir que no son *explicables* según estos mismos principios, que en cierto modo transcienden, y que otros principios, sólo aplicables a ellos, deban ser invocados. La biosfera es, en mi opinión, imprevisible en el mismo grado que lo es la configuración particular de los átomos que constituyen este guijarro que tengo en mi mano. Nadie reprocharía a una teoría universal el no afirmar y prever la existencia de esta configuración particular de átomos; nos basta que este objeto actual, único y real, sea *compatible* con la teoría. Este objeto no tiene, según la teoría, el deber de existir, mas tiene el derecho.

Esto nos basta tratándose de un guijarro, pero no si se trata de nosotros mismos. Nosotros nos queremos necesarios, inevitables, ordenados desde siempre. Todas las religiones, casi todas las filosofías, una parte de la ciencia, atestiguan el incansable, heroico esfuerzo de la humanidad negando desesperadamente su propia contingencia.

# 3

# Los demonios de Maxwell

### *Las proteínas como agentes moleculares de la teleonomía estructural y funcional*

La noción de teleonomía implica la idea de una actividad *orientada, coherente y constructiva.* Por estos criterios, las proteínas deben ser consideradas como los agentes moleculares esenciales de las *performances* teleonómicas de los seres vivos.

1. Los seres vivos son máquinas químicas. El crecimiento y la multiplicación de todos los organismos exigen que sean cumplidas millares de reacciones químicas, gracias a las cuales son elaborados los constituyentes esenciales de las células. Es lo que se llama el «metabolismo». Este metabolismo está organizado en un gran número de «vías», divergentes, convergentes o cíclicas, comprendiendo cada cual una secuencia de reacciones. La orientación precisa y el rendimiento elevado de esta enorme y microscópica actividad química están asegurados por una cierta clase de proteínas, las enzimas, que representan el papel de catalizadores específicos.

2. Como una máquina, todo organismo, incluido el más «simple», constituye una unidad funcional coherente e integrada. Evidentemente, la coherencia funcional de una máquina química tan compleja, y además autónoma, exige la intervención de un sistema cibernético que gobierne y controle la actividad química en numerosos puntos. Estamos lejos aún, sobre todo en los organismos superiores, de haber elucidado la estructura íntegra de estos sistemas. Hoy se conocen, sin embargo, muchos elementos, y en todos estos casos se ha comprobado que los agentes

esenciales son proteínas llamadas «reguladoras», que desempeñan, en suma, el papel de detectores de señales químicas.

3. El organismo es una máquina que se construye a sí misma. Su estructura macroscópica no le es impuesta por la intervención de fuerzas exteriores. Se constituye de forma autónoma, gracias a interacciones constructivas internas. Aunque nuestros conocimientos concernientes a la mecánica del desarrollo sean totalmente insuficientes, sin embargo se puede, desde ahora, afirmar que las interacciones constructivas son microscópicas, moleculares, y que las moléculas en litigio son esencialmente, si no únicamente, proteínas.

Son proteínas, por consecuencia, las que canalizan la actividad de la máquina química, aseguran la coherencia de su funcionamiento y la construyen. Todas estas *performances* teleonómicas de las proteínas reposan en último lugar sobre las propiedades llamadas «estereoespecíficas», es decir, su capacidad de «reconocer» a otras moléculas (comprendidas otras proteínas) según su *forma*, que es determinada por su estructura molecular. Se trata, literalmente, de una propiedad discriminativa (si no «cognitiva») microscópica. Se puede admitir que toda *performance* o estructura teleonómica de un ser vivo, sea cual sea, puede en principio ser analizada en términos de interacciones estereoespecíficas de una, de varias, o de numerosas proteínas.[1]

Es de la estructura, de la forma de una proteína dada, de la que depende la discriminación estereoespecífica particular que constituye su función. En la medida en que se sabría describir el origen y la evolución de esta estructura se rendiría cuenta también del origen y de la evolución de la *performance* teleonómica a la que esté entregada.

En el presente capítulo se discutirá la función catalítica específica de las proteínas; en el siguiente, la función reguladora, y en el capítulo V, la función constructora. El problema del origen de las estructuras funcionales será abordado en este capítulo y vuelto a considerar en el siguiente.

1. Hay una simplificación deliberada. Ciertas estructuras del ADN juegan un papel que es preciso considerar como teleonómico. Además ciertos ARN (ácidos ribonucleicos) constituyen piezas esenciales de la maquinaria que traduce del código genético (cf. Apéndice, pág. 177). Sin embargo, proteínas específicas están igualmente implicadas en estos mecanismos que, en casi todos los estados, ponen en juego interacciones entre proteínas y ácidos nucleicos. La omisión de toda discusión de estos mecanismos no afecta al análisis de las interacciones teleonómicas moleculares y su interpretación general.

Se puede, en efecto, estudiar las propiedades funcionales de una proteína sin tener que referirse al detalle de su estructura particular. (No se conoce todavía hoy, en todos sus detalles, la estructura en el espacio más que de unas quince proteínas.) No obstante es necesario el repaso de algunos datos generales.

Las proteínas son moléculas muy grandes, de peso molecular variando entre 10.000 y 1.000.000 o más. Estas macromoléculas están constituidas por la polimerización secuencial de compuestos de peso molecular cercano a 100, pertenecientes a la clase de los «aminoácidos». Toda proteína contiene pues de 100 a 10.000 radicales aminoácidos. Sin embargo, estos numerosísimos radicales pertenecen a sólo 20 especies químicas diferentes[2] que se encuentran en todos los seres vivientes, desde las bacterias al hombre. Esta monotonía de composición constituye una de las más patentes ilustraciones del hecho de que la prodigiosa diversidad de estructuras *macroscópicas* de los seres vivos reposa en realidad sobre una profunda y no menos remarcable unidad de composición y de estructura *microscópica.* Volveremos a ello.

Según su forma general, se pueden distinguir dos clases principales de proteínas:

a) las proteínas llamadas «fibrosas»; son moléculas muy alargadas que juegan en los seres vivos un papel principalmente mecánico, a la manera del aparejo de un barco de vela; aunque las propiedades de algunas de ellas (las del músculo) sean muy interesantes, no las citaremos aquí;

b) las proteínas llamadas «globulares»; son, con mucho, las más numerosas y, por sus funciones, las más importantes; en estas proteínas las fibras constituidas por la polimerización secuencial de los aminoácidos están replegadas sobre sí mismas, de manera extremadamente compleja, confiriendo así a estas moléculas una estructura compacta, pseudo globular.[3]

Los seres vivos, incluso los más simples, contienen un gran número de proteínas diferentes. Se puede estimar este número en $2.500 \pm 500$, para la bacteria *Escherichia coli* ($5 \times 10^{-13}$ g de peso y 2 μ de longitud, aproximadamente). Para los animales superiores, como por ejemplo el hombre, se barajan cifras que rozan el millón.

2. Ver Apéndice, pág. 172.
3. Ver Apéndice, pág. 174.

*Las proteínas enzimas como catalizadores específicos*

Entre los millares de reacciones químicas que contribuyen al desarrollo y a las *performances* de un organismo, cada una es provocada electivamente por una proteína-enzima particular. Se puede, sin simplificar casi, admitir que cada enzima, en el organismo, ejerce su actividad catalítica en un solo punto del metabolismo. Es ante todo por su extraordinaria *electividad* de acción que las enzimas se distinguen de los catalizadores no biológicos empleados en laboratorio o en la industria. Entre estos últimos los hay muy activos, es decir, capaces en muy pequeña cantidad de acelerar considerablemente diversas reacciones. Ninguno de estos catalizadores, no obstante, se aproxima en especificidad de acción a la enzima más «vulgar».

Esta especificidad es doble:

1. Cada enzima no cataliza más de un solo tipo de reacción.
2. Entre los cuerpos, a veces muy numerosos en el organismo, susceptibles de sufrir este tipo de reacción, la enzima, por regla general, no es activa más que con respecto a uno solo.

Algunos ejemplos permitirán aclarar estas proposiciones.

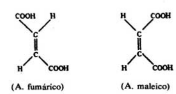
Existe una enzima (llamada fumarasa) que cataliza la hidratación (adición de agua) del ácido fumárico en ácido málico:

$$\begin{array}{c} COOH \\ | \\ CH \\ \| \\ CH \\ | \\ COOH \end{array} \quad \xrightarrow[\quad]{(+H_2O)} \quad \begin{array}{c} COOH \\ | \\ HCOH \\ | \\ CH_2 \\ | \\ COOH \end{array}$$

(A. fumárico) (A. málico)

Esta reacción es reversible y la misma enzima cataliza igualmente la deshidratación del ácido málico en ácido fumárico.

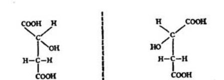
Existe, sin embargo, un isómero geométrico del ácido fumárico, el ácido maleico:



(A. fumárico) (A. maleico)

capaz químicamente de sufrir la misma hidratación. La enzima es totalmente inactiva en contacto con el segundo.

Pero además existen dos isómeros *ópticos* del ácido málico, que poseen un carbono asimétrico:[4]



(A. L-málico) (A. D-málico)

Estos dos cuerpos, imágenes en un espejo el uno del otro, son químicamente equivalentes y prácticamente inseparables por las técnicas químicas clásicas. Entre los dos, sin embargo, la enzima ejerce una discriminación absoluta. En efecto:

1. la enzima deshidrata exclusivamente al ácido L-málico para producir exclusivamente ácido fumárico;
2. a partir de ácido fumárico, la enzima produce exclusivamente ácido L-málico y no ácido D-málico.

La discriminación rigurosa ejercida por la enzima entre los isómetros ópticos no constituye solamente una ilustración espectacular de la especificidad *estérica* de las enzimas. En primer lugar se encuentra aquí la explicación del hecho, durante largo tiempo misterioso, de que entre los numerosos constituyentes

4. Los cuerpos que contienen un átomo de carbono unido a cuatro grupos diferentes están por este hecho desprovistos de simetría. Se les llama «ópticamente activos» porque al ser atravesados con la luz polarizada se verifica una rotación en el plano de polarización, hacia la izquierda (cuerpos levógiros: L) o hacia la derecha (cuerpos dextrógiros: D).

químicos celulares que son disimétricos (de hecho es el caso de la mayoría), uno solo de los dos isómeros ópticos esté, por regla general, representado en la biosfera. Pero, en segundo lugar, según el principio muy general de Curie sobre la conservación de la simetría, el hecho de que a partir de un cuerpo ópticamente simétrico (ácido fumárico) sea obtenido un cuerpo disimétrico impone que:

1. la enzima constituya la «fuente» de disimetría; o sea, que ella misma sea ópticamente activa, lo que sucede en este caso;
2. la simetría inicial del substrato se pierda en el curso de su interacción con la proteína-enzima. Es preciso pues que la reacción de hidratación tenga lugar en el seno de un «complejo» formado por una asociación temporal entre la enzima y el substrato; en un complejo así, la simetría inicial del ácido fumárico sería efectivamente perdida.

La noción de «complejo esteroespecífico», como explicación de la especificidad así como de la actividad catalítica de las enzimas, es de una importancia capital. Volveremos sobre ello tras haber discutido otros ejemplos.

Existe (en ciertas bacterias) otra enzima, llamada aspartasa que, también, actúa exclusivamente sobre el ácido fumárico, a exclusión de todo otro cuerpo, especialmente de su isómero geométrico, el ácido maleico. La reacción de «adición sobre el doble enlace» catalizada por esta enzima es casi análoga a la precedente. Esta vez, no se trata de una molécula de agua, sino de amoníaco, la que es condensada con el ácido fumárico, para dar un aminoácido, el aspártico:

COOH H ... C=C ... H COOH + :N(H)(H)(H) ⇌ COOH H ... C(NH₂)—C(H) ... H COOH

(A. fumárico) (A. L-aspártico)

El ácido aspártico posee un carbono asimétrico; es pues ópticamente activo. Como en el caso precedente, la reacción enzimática produce exclusivamente uno de los isómeros, el de la serie L, llamado isómero «natural» porque los aminoácidos entran en la composición de las proteínas perteneciendo todos a la serie L.

Las dos enzimas, aspartasa y fumarasa, discriminan pues estrictamente, no sólo entre los isómeros ópticos y geométricos de sus substratos y productos, sino igualmente entre las moléculas de agua y de amoníaco. Se tiende a admitir que estas últimas moléculas entran, asimismo, en la composición del complejo estereoespecífico en cuyo seno se produce la reacción de adición y que, en este complejo, las moléculas están rigurosamente colocadas las unas con respecto a las otras. Es de esta ordenación de lo que depende el que resulte tanto la especificidad de acción como la estereoespecificidad de la reacción.

De los ejemplos precedentes, la existencia de un complejo estereoespecífico como intermediario de la reacción enzimática no podía ser deducido más que a título de hipótesis explicativa. En ciertos casos favorables es posible demostrar directamente la existencia de este complejo. Es el caso de la enzima llamada β-galactosidasa, que cataliza específicamente la hidrólisis de los cuerpos que poseen la estructura dada por la fórmula A:

(A) (B)

(En estas fórmulas, R representa un radical cualquiera.)

Recordemos que existen numerosos isómeros de tales cuerpos. (16 isómeros geométricos, que difieren por la orientación relativa de los grupos OH y H en los carbonos 1 al 5, más los antípodas ópticos de cada uno de estos isómeros.)

La enzima, de hecho, discrimina rigurosamente entre todos estos isómeros, y no hidroliza más que uno de ellos. Se puede, sin embargo, «engañar» a la enzima sintetizando «análogos estéricos» de los cuerpos de esta serie, en los cuales el oxígeno de la unión hidrolizable es reemplazado por azufre (fórmula B). El átomo de azufre, mayor que el de oxígeno, tiene la misma valencia, y la orientación de las valencias es la misma en los dos átomos. La *forma* tridimensional de estos derivados azufrados es pues prácticamente la misma que la de sus homólogos de oxíge-

no. Pero la unión formada por el azufre es mucho más estable que la del oxígeno. Estos cuerpos no son pues hidrolizados por la enzima. Sin embargo, se puede demostrar *directamente* que forman con la proteína un complejo estereoespecífico.

Tales observaciones no solamente confirman la teoría del complejo, sino demuestran que una reacción enzimática debe ser considerada como comportando dos etapas distintas:

1. la formación de un complejo estereoespecífico entre proteína y substrato;
2. la activación catalítica de una reacción en el seno del complejo; reacción *orientada y especificada* por la estructura del mismo complejo.

*Uniones covalentes y no covalentes*

Esta distinción es de una importancia capital y nos va a permitir dar a luz una de las nociones más importántes de la biología molecular. Pero antes hace falta recordar que, entre los diferentes tipos de uniones que pueden contribuir a la estabilidad de un edificio químico, es necesario distinguir dos clases:

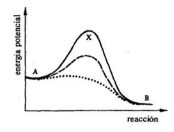
a) las uniones llamadas covalentes;
b) las uniones no covalentes.

Las uniones covalentes (a las que se les reserva a menudo el nombre de «unión química» *sensu stricto*) son debidas a la compartición de orbitales electrónicos entre dos o más átomos. Las uniones no covalentes son debidas a otros varios tipos de interacciones (que no implican la compartición de orbitales electrónicos).

No es necesario, para lo que aquí estamos tratando, especificar la naturaleza de las fuerzas físicas que intervienen en estos diferentes tipos de interacciones. Subrayemos primeramente que las dos clases de uniones difieren las unas de las otras por la energía de las asociaciones que aseguran. Simplificando un poco, y precisando que sólo consideramos aquí reacciones que se producen en fase acuosa, se puede en efecto admitir que la energía absorbida o liberada, por término medio, por una reacción que implica uniones covalentes, es del orden de 5 a 20 kcal (por unión). Para una reacción que implica únicamente uniones no covalentes, la energía media sería de 1 a 2 kcal.[5]

5. Recordemos que la energía de una unión es, por definición, la que es

Esta importante diferencia pone de manifiesto en parte la diferencia de estabilidad entre edificios «covalentes» y «no covalentes». Lo esencial, sin embargo, no está en eso, sino en la diferencia de las energías llamadas de «activación» puestas en juego en los dos tipos de reacciones. Esta noción es de una extrema importancia. Para precisarla, recordemos que una reacción que hace pasar una población molecular de un estado estable dado a otro, debe ser considerada incluyendo un estado intermediario de energía potencial *superior* a la de los estados finales. Se representa a menudo este proceso por una gráfica cuya abscisa representa la progresión de la reacción y la ordenada la energía potencial (fig. 1).




A: estado estable inicial.
B: estado estable final.
X: estado intermedio, de energía potencial superior a la de los dos estados estables.
*Trazo continuo:* reacción covalente.
*Trazo discontinuo:* reacción covalente en presencia de un catalizador que disminuye la energía de activación.
*Trazo punteado:* reacción no covalente.

*Fig. 1. Diagrama de la variación de la energía potencial de las moléculas en el curso de una reacción.*

La diferencia de energía potencial entre los estados finales corresponde a la energía liberada por la reacción. La diferencia entre el estado inicial y el estado intermedio (llamado «activado») es la energía de activación. Es la energía que las moléculas deben *transitoriamente* adquirir para entrar en reacción. Esta energía, adquirida en una primera etapa, liberada en la segunda, no figura en el balance termodinámico final. Es de ella, sin embargo, que depende la *velocidad* de la reacción, que será prácticamente nula, a temperatura ordinaria, si la energía de acti-

preciso suministrar *para romperla.* Pero, de hecho, la mayoría de las reacciones, principalmente bioquímicas, consisten en el *intercambio* de uniones, más que su ruptura pura y simple. La energía puesta en juego en una reacción es la que corresponde a un *intercambio* del tipo:

$$AY + BX \longrightarrow AX + BY$$

Ella es pues siempre inferior a la energía de ruptura.

vación es elevada. Para provocarla, será preciso, pues, o bien aumentar considerablemente la temperatura (de la que depende la fracción de moléculas que han adquirido la energía suficiente), o bien emplear un catalizador, cuyo papel es el de «estabilizar» el estado activado, o sea, reducir la diferencia de potencial entre este estado y el estado inicial.

Por lo tanto, y éste es el punto importante, en general:

a) la energía de activación de las reacciones covalentes es elevada; su velocidad es pues muy pequeña o nula a temperatura baja y en ausencia de catalizadores;

b) la energía de activación de las reacciones no covalentes es muy pequeña, si no nula; ellas se producen pues espontáneamente, y *muy rápidamente a temperatura baja*, y en *ausencia de catalizadores.*

De ello resulta que las estructuras definidas por interacciones no covalentes no pueden alcanzar una cierta estabilidad más que poniendo en juego interacciones *múltiples.* Además, las interacciones no covalentes no adquieren una energía notable hasta que los átomos están a distancias muy pequeñas, prácticamente «en contacto» unos con otros. En consecuencia, dos moléculas (o regiones de moléculas) no podrán contraer una asociación no covalente a menos que las superficies de las dos moléculas comprendan *áreas complementarias* que permitan a varios átomos de una entrar en contacto con varios átomos de la otra.

### *La noción de complejo estereoespecífico no covalente*

Si añadimos ahora que los complejos formados por enzima y substrato son de naturaleza no covalente, se verá por qué estos complejos son *necesariamente* estereoespecíficos: no se pueden formar más que si la molécula de enzima comporta un área exactamente «complementaria» de la forma de la molécula de substrato. Se verá también que, en el complejo, la molécula de substrato está necesariamente colocada de manera muy rigurosa gracias a las múltiples interacciones que la asocian al área receptora de la molécula de enzima.

Se verá, en fin, que según el *número* de interacciones no covalentes que él pone en juego, la estabilidad de un complejo no covalente podrá variar en una escala muy amplia. Es ésta una importante propiedad de los complejos no covalentes: su estabilidad puede estar exactamente adaptada a la función desempeña-

da. Los complejos enzima-substrato deben poder hacerse y deshacerse muy rápidamente; es la condición de una alta actividad catalítica. Estos complejos son, en efecto, fácil y muy rápidamente disociables. Otros complejos, cuya función es permanente, adquieren una estabilidad del mismo orden que la de una asociación covalente.

Sólo hemos discutido hasta el presente sobre la primera etapa de una reacción enzimática: la formación del complejo estereoespecífico. La etapa catalítica en sí, que sigue a la formación del complejo, no nos dentendrá tanto, ya que no plantea problemas tan profundamente significativos, desde un punto de vista biológico, como la precedente. Se admite hoy en día que la catálisis enzimática resulta de la acción inductora y polarizante de ciertos grupos químicos, presentes en el «receptor específico» de la proteína. Especificidad aparte (debida al posicionamiento muy preciso de la molécula de substrato respecto a los grupos inductores), el efecto catalítico se explica por esquemas parecidos a los que muestran la acción de los catalizadores no biológicos (como, principalmente, los iones $H^+$ y $OH^-$).

La formación del complejo estereoespecífico, como preludio al acto catalítico, en sí puede pues ser considerada para el desempeño a la vez de dos funciones:

1. la *elección* exclusiva de un substrato, determinada por su estructura estérica;

2. la *presentación* del substrato según una orientación precisa que limita y especifica el efecto catalítico de los grupos inductores.

La noción de complejo estereoespecífico no covalente no se aplica sólo a las enzimas ni incluso únicamente, como se verá, a las proteínas. Es de una importancia central para la interpretación de todos los fenómenos de elección, de discriminación electiva, que caracterizan a los seres vivos y les dan la apariencia de escapar a la suerte que prevé el segundo principio. Es interesante, a este respecto, considerar de nuevo el ejemplo de la fumarasa.

Si se realiza la aminación del ácido fumárico por los medios de la química orgánica, se obtiene una mezcla de los dos isómeros ópticos del ácido aspártico. La enzima, al contrario, cataliza exclusivamente la formación de ácido L-aspártico. De este modo, aporta una información que corresponde con exactitud a una elección binaria (ya que hay dos isómeros). Se ve así, al nivel más elemental, cómo la información estructural puede ser creada

y distribuida en los seres vivos. La enzima posee, desde luego, en la estructura de su receptor estereoespecífico, la información correspondiente a esta elección. Pero la energía necesaria para la *amplificación* de esta información no viene de la enzima: para orientar la reacción exclusivamente según uno de los dos caminos posibles, la enzima utiliza el potencial químico constituido por la solución de ácido fumárico. Toda la actividad de síntesis de las células, por compleja que sea, es, en último lugar, interpretable en los mismos términos.

## *El demonio de Maxwell*

Estos fenómenos, prodigiosos por su complejidad y su eficacia en la realización de un programa fijado de antemano, imponen evidentemente la hipótesis de que son guiados por el ejercicio de funciones de algún modo «cognitivas». Es una función así la que Maxwell atribuyó a su demonio microscópico. Se recuerda que este demonio, apostado en el orificio de comunicación entre dos recintos llenos de un gas cualquiera, se suponía que maniobraba sin consumo de energía una trampa ideal que le permitía prohibir el paso de ciertas moléculas de un recinto a otro. El demonio podía pues «escoger» el no dejar pasar en un sentido más que a las moléculas rápidas (de alta energía) y en el otro sólo las moléculas lentas (de baja energía). El resultado era que, de los dos recintos inicialmente a la misma temperatura, uno se calentaba mientras que el otro se enfriaba, todo ello sin consumo aparente de energía. Para imaginarnos lo que fue esta experiencia habría que recordar el revuelo que causó en los medios científicos, concretamente físicos: parecía en efecto que, *por el ejercicio de su función cognitiva,* el demonio tuviese el poder de violar el segundo principio. Y como esta función cognitiva no parecía ni medible, ni incluso definible desde el punto de vista físico, la «paradoja» de Maxwell parecía escapar a todo análisis en términos operacionales.

La clave de la paradoja fue dada por Léon Brillouin, inspirándose en un trabajo anterior de Szilard: demostró que el ejercicio de sus funciones cognitivas por el demonio debía *necesariamente* consumir una cierta cantidad de energía que, en el balance de la operación, compensaba precisamente la disminución de entropía del sistema. En efecto, para que el demonio cierre la trampa «con conocimiento de causa», es preciso que antes haya

*medido* la velocidad de cada partícula de gas. Luego, toda medida, es decir toda *adquisición de información,* supone una interacción, consumidora de energía.

Este célebre teorema es una de las fuentes de concepciones modernas relativas a la equivalencia entre la información y la entropía negativa. Este teorema nos interesa en nuestro caso por el hecho de que las enzimas ejercen precisamente, a escala microscópica, una función creadora de orden. Pero esta creación de orden, como hemos visto, no es gratuita; ella tiene lugar a expensas de un consumo de potencial químico. Las enzimas, en definitiva, funcionan exactamente a la manera del demonio de Maxwell corregido por Szilard y Brillouin, drenando el potencial químico en las vías escogidas por el programa del que ellos son los ejecutantes.

Retengamos la noción esencial desarrollada en este capítulo: es gracias a su capacidad de formar, con otras moléculas, complejos *estereoespecíficos y no covalentes,* por el que las proteínas ejercen sus funciones «demoníacas». Los capítulos siguientes ilustrarán la importancia central de esta noción clave, que se volverá a encontrar como interpretación última de las propiedades más distintivas de los seres vivos.

# 4

# Cibernética microscópica

En virtud misma de su extrema especificidad, una enzima «clásica» (como las que han sido tomadas como ejemplo en el capítulo precedente) constituye una unidad funcional totalmente independiente. La función «cognitiva» de estos «demonios» se reduce al reconocimiento de su substrato específico, excluyendo todo otro cuerpo y todo acontecimiento que pueda producirse en la maquinaria química de la célula.

### *Coherencia funcional de la maquinaria celular*

La simple inspección de un esquema que resuma los conocimientos actuales sobre el metabolismo celular bastaría para hacernos adivinar que si incluso, en cada etapa, la enzima que tiene la carga cumple su tarea a la perfección, la suma total de estas actividades no podría conducir más que a un caos si éstas no estuviesen, de algún modo, sujetas las unas a las otras para formar un sistema coherente. Así se tienen las pruebas más manifiestas de la eficacia extrema de la maquinaria química de los seres vivos, de los más «simples» a los más «complejos».

En los animales se conoce por descontado desde largo tiempo la existencia de sistemas que aseguran la coordinación a gran escala de las *performances* del organismo. Tales son las funciones del sistema nervioso y del sistema endocrino. Estos sistemas aseguran la coordinación entre órganos o tejidos, es decir, en definitiva, *entre células.* Que en el seno de cada célula una red cibernética casi tan compleja como ella (si no más aún) asegura

la coherencia funcional de la maquinaria química intracelular, donde se centran los descubrimientos que datan, en su mayoría, de los veinte si no de los cinco o diez últimos años.

## *Proteínas reguladoras y lógica de las regulaciones*

Se está muy lejos aún de haber analizado en su integridad el sistema que gobierna el metabolismo, el crecimiento y la división de las células más simples que se conoce: las bacterias. Pero, gracias al análisis detallado de ciertas partes de este sistema, se comprenden hoy bastante bien los principios de su funcionamiento. Es de estos principios que discutiremos en el presente capítulo. Veremos que las operaciones cibernéticas elementales están aseguradas por proteínas especializadas, que juegan el papel de detectores e integradores de información química.

Entre estas proteínas reguladoras, las mejor conocidas en la actualidad son enzimas llamadas «alostéricas». Estas enzimas constituyen una clase particular, en razón de las propiedades que las distinguen de las enzimas «clásicas». Como estas últimas, las enzimas alostéricas reconocen y se asocian a un substrato específico, y activan su conversión en productos. Pero además, estas enzimas tienen la propiedad de reconocer electivamente uno o varios *otros* compuestos cuya asociación (estereoespecífica) con la proteína tiene por efecto modificar, es decir, según el caso, *acrecentar o inhibir su actividad con respecto al substrato.*

La función reguladora, coordinadora, de las interacciones de este tipo (llamadas interacciones alostéricas) está hoy en día probada por numerosos ejemplos. Se pueden clasificar estas interacciones en un cierto número de «modos regulatorios», según las relaciones que existen entre la reacción considerada y el origen metabólico de los «*efectores* alostéricos» que la controlan. Los principales modos regulatorios son los siguientes (fig. 2).

1. *Inhibición retroactiva:* la enzima que cataliza la primera reacción de una secuencia que finaliza en un metabolito esencial (constituyente de las proteínas o de los ácidos nucleicos, por ejemplo)[1] es inhibida por el producto último de la secuencia. La

1. Se llama «metabolito» a todo cuerpo producido por el metabolismo; «metabolitos esenciales» a los cuerpos universalmente requeridos para el crecimiento y la multiplicación de las células.

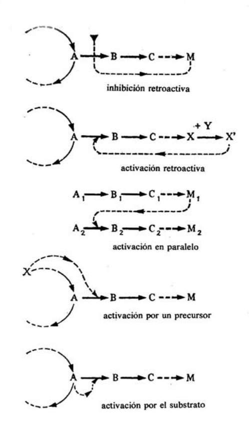



*Fig. 2. Diversos «modos regulatorios» asegurados por interacciones alostéricas.*

Las flechas en trazo grueso simbolizan reacciones produciendo cuerpos intermediarios (A, B, etc.). La letra M representa el metabolito terminal, resultado de la secuencia de reacciones. El trazo punteado indica el origen y el punto de aplicación de un metabolito actuando como efector alostérico, ihibidor o activador de una reacción (ver texto página anterior).

concentración intracelular de este metabolito gobierna pues la velocidad de su propia síntesis.

2. *Activación retroactiva:* la enzima es activada por un producto de degradación del último metabolito. Este caso es frecuente en los metabolitos cuyo potencial químico elevado constituye una moneda de cambio en el metabolismo. Este modo de regulación contribuye pues a mantener a un nivel prescrito el potencial químico disponible.

3. *Activación en paralelo:* la primera enzima de una secuencia metabólica, que conduce a un metabolito esencial, es activada por un metabolito sintetizado por una secuencia independiente y paralela. Este modo de regulación contribuye a ajustar recíprocamente las concentraciones de metabolitos pertenecientes a una misma familia y destinados a reunirse en una de las clases de macromoléculas.

4. *Activación por un precursor:* la enzima es activada por un cuerpo que es un precursor más o menos lejano de su substrato inmediato. Este modo de regulación subordina en suma la «demanda» a la «oferta». Un caso particular, extremadamente frecuente, de este modo regulatorio, es la activación de la enzima por el substrato que desempeña a la vez su papel «clásico» y el de efector alostérico con respecto a la enzima.

Es raro que una enzima alostérica esté sujeta sólo a uno de estos modos de regulación. Por regla general estas enzimas están simultáneamente subordinadas a varios efectores alostéricos, antagonistas o cooperativos. Una situación que se encuentra frecuentemente es una regulación «ternaria» comprendiendo:

1. activación por el substrato (modo 4);
2. inhibición por el producto último de la secuencia (modo 1);
3. activación en paralelo por un metabolito de la misma familia que el último producto (modo 3).

La enzima reconoce pues los tres efectores simultáneamente, «mide» sus concentraciones relativas, y su actividad en todo instante representa la adición de estas tres informaciones.

Con objeto de ilustrar el refinamiento de estos sistemas, se puede mencionar, por ejemplo, los modos de regulación de las vías metabólicas «ramificadas» que son numerosas (fig. 3). En ese caso, en general, no sólo las reacciones iniciales, situadas en la bifurcación metabólica, son regularizadas por inhibición retroactiva, sino que la reacción inicial de la rama común es gober-

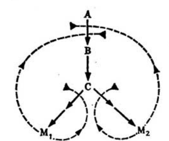



*Fig. 3. Regulación alostérica de las vías metabólicas ramificadas. Iguales símbolos que en la figura 2 (ver texto pág. 80).*

nada a la vez por los dos (o los varios) metabolitos finales.[2] El peligro de bloqueo de la síntesis de uno de los metabolitos por un exceso del otro es evitado, dependiendo de los casos, de dos formas diferentes:

1. sea asignando a esta reacción única dos enzimas alostéricos distintos, cada uno inhibido por uno de los metabolitos con exclusión del otro;

2. sea con una sola enzima que no es inhibida más que de manera «concertada» por los dos metabolitos a la vez, pero no por uno solo de entre ellos.

Es preciso insistir en el hecho de que, substrato a parte, los efectores que regulan la actividad de una enzima alostérica no participan en nada en la reacción en sí. En general no forman con la enzima más que un complejo no covalente, entera e instantáneamente reversible, de donde son liberados sin ninguna modificación. El consumo de energía correspondiente a la interacción reguladora es prácticamente nula: no representa más que una fracción ínfima del potencial químico intracelular de los efectores. Al contrario, la reacción catalítica gobernada por estas interacciones muy débiles puede implicar transmisiones de energía relativamente considerables. Estos sistemas son, pues, comparables a los que se emplean en los circuitos electrónicos de automoción, donde la energía muy débil consumida por un relé puede desencadenar una operación

2. E. R. Stadtman, *Advances in Enzymology*, 28, 41-159 (1966).
G. N. Cohen, *Current Topics in Cellular Regulation*, I, 183-231 (1968).

considerable, como, por ejemplo, el encendido de un cohete balístico.

* * *

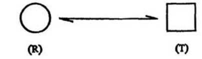
Igual que un relé electrónico puede estar subordinado simultáneamente a varios potenciales eléctricos, igual, como se ha visto, una enzima alostérica lo está, en general, a varios potenciales químicos. Pero la analogía va más lejos todavía. Como se sabe, interesa generalmente que la respuesta de un relé electrónico sea *no lineal* respecto a las variaciones de potencial que lo gobiernan. Se obtienen así efectos de umbral que aseguran una regulación más precisa. Ello sucede igual en la mayoría de las enzimas alostéricas. La gráfica, representando la variación de actividad de una enzima de estas características en función de la concentración de un efector (comprendido el substrato), es casi siempre «sigmoidal». En otros términos, el efecto del ligando[3] crece *más deprisa que su concentración.* Esta propiedad es tanto más notable al ser característica de las enzimas alostéricas. En las enzimas ordinarias, o «clásicas», el efecto crece siempre *más lentamente* que la concentración.

No sé cuál podría ser el peso mínimo de un relé electrónico presentando las mismas propiedades lógicas que una enzima alostérica media (medida y suma de tres o cuatro potenciales, solicitando una respuesta con efecto de umbral). Supongamos que sea $10^{-2}$ gramos. El peso de una molécula de una enzima alostérica capaz de las mismas *performances* es del orden de $10^{-17}$ gramos. O sea, mil millones de veces menor que el relé electrónico. Este número astronómico da una ligera idea de la «potencia cibernética» (es decir, teleonómica) de la que puede disponer una célula provista de algunas centenas o millares de especies de estos seres microscópicos, mucho más inteligentes aún que el demonio de Maxwell-Szilard-Brillouin.

3. Se da el nombre de «ligando» a un cuerpo caracterizado como tendente a ligarse a otro.

*Mecanismo de las interacciones alostéricas*

La cuestión es saber cómo estas *performances* complejas son llevadas a cabo por este relé molecular que constituye una proteína alostérica. Se admite hoy, sobre la base de un conjunto de hechos experimentales, que las interacciones alostéricas son debidas a transiciones discretas de estructura molecular de la misma proteína. Veremos en el próximo capítulo que la estructura complicada y compacta de una proteína globular está estabilizada por muy numerosas uniones *no covalentes* que, reunidas, cooperan al mantenimiento de la estructura. Se concibe entonces que a ciertas proteínas, dos (o varios) estados estructurales sean accesibles (igual que ciertos cuerpos pueden existir en diferentes estados alotrópicos). Se simbolizan a menudo los dos estados en cuestión, y la «transmisión alostérica» que hace pasar la molécula reversiblemente del uno al otro de la manera siguiente:




Sentado esto, se admite (y se demuestra directamente en los casos favorables) que en razón de las estructuras *estéricas* diferentes de los dos estados, las propiedades de reconocimiento estereoespecíficas de la proteína son modificadas por la transición. Por ejemplo, en el estado «R», la proteína podrá asociarse a un ligando $\alpha$ pero no a otro ligando $\beta$ que será reconocido (a exclusión de $\alpha$) en el estado «T». La presencia de uno de los ligandos tendrá pues por efecto estabilizar uno de los estados a expensas del otro, y se ve que $\alpha$ y $\beta$ serán antagonistas uno del otro, ya que sus asociaciones respectivas con la proteína son mutuamente exclusivas. Supongamos ahora un tercer ligando $\gamma$ (que podría ser el substrato) asociándose exclusivamente con la forma R, en una región de la molécula distinta a donde se fija $\alpha$. Se ve que $\alpha$ y $\gamma$ cooperarán a la estabilización de la proteína en el estado activo (el que reconoce el substrato). El ligando $\alpha$ y el substrato $\gamma$ actuarán pues como activadores, el ligando $\beta$, como inhibidor. La actividad de una población de moléculas será proporcional a la fracción de ellas que estarán en el estado R, fracción que depende evidentemente de la concentración relativa de

los tres ligandos, así como del valor del equilibrio intrínseco entre R y T. Es así que la reacción catalítica se encontrará subordinada a los valores de estos tres potenciales químicos.

Insistamos ahora sobre la noción más importante que implica este esquema: a saber, que las interacciones cooperativas o antagonistas de los tres ligandos son *totalmente indirectas. No hay, de hecho, interacciones entre los ligandos, sino exclusivamente entre la proteína y cada uno de ellos separadamente.* Volveremos más adelante sobre esta noción fundamental, fuera de la cual parece imposible comprender el origen y el desarrollo de los sistemas cibernéticos en los seres vivos.[4]

A partir de este esquema de interacciones indirectas, es posible darse cuenta igualmente del sutil perfeccionamiento que representa la respuesta «no lineal» de la proteína a las variaciones de concentración de sus efectores. Todas las proteínas alostéricas conocidas son en efecto «oligómeros», compuestos por la asociación no covalente de subunidades (protómeros) químicamente idénticas, en pequeño número (a menudo 2 o 4; más raramente 6, 8 o 12). Cada protómero lleva un receptor para cada uno de los ligandos que la proteína reconoce. Por el hecho de su asociación con uno o varios protómeros, la estructura estérica de cada uno es parcialmente «constreñida» por sus vecinos. Pero la teoría, confirmada por la experiencia de los cristalógrafos, demuestra que las proteínas oligoméricas tienden a adoptar estructuras tales que todos los protómeros son geométricamente equivalentes; los apremios que sufren son pues distribuidos simétricamente entre los protómeros.

Tomemos ahora el caso más simple, el de un dímero: examinemos lo que lleva consigo su disociación en dos monómeros; se ve que la ruptura de la asociación va a permitir a los dos monómeros adoptar un estado «relajado», estructuralmente diferente del «constreñido» que poseían en el estado asociado.

Diremos que el cambio de estado de los dos protómeros está «concertado». Es esta concertación la que prueba la no linealidad de la respuesta; en efecto, la estabilización por una molécula de ligando del estado disociado R en uno de los monómeros prohíbe el retorno del otro al estado asociado, y sucede igual en sentido inverso. El equilibrio entre los dos estados será una función cuadrática de la concentración de los ligandos. Esto es, una fun-

4. J. Monod, J.-P. Changeux, y F. Jacob, «Journal of Molecular Biology», 6, págs. 306-329 (1963).

ción de potencia cuatro para un tetrámero, y así consecutivamente.[5]




He tratado voluntaria y únicamente el modelo más posible, efectivamente realizado por ciertos sistemas que podemos considerar como «primitivos». En los sistemas reales, la disociación no es más que raramente completa: los protómeros permanecen asociados en los dos estados, aunque de forma más laxa en uno de ellos.

Numerosas variaciones son además posibles sobre este tema de base, pero lo esencial era mostrar que mecanismos moleculares extremadamente simples en sí mismos, permiten rendir cuenta de las propiedades «integrativas» de las proteínas.

* * *

Las enzimas alostéricas citadas hasta el presente constituyen a la vez una unidad de función química y un elemento mediador de interacciones reguladoras. Sus propiedades permiten comprender cómo el estado homeostático del *metabolismo celular* es conservado al máximo de eficacia y de coherencia.

*Regulación de la síntesis de las enzimas*

Se entiende por «metabolismo» esencialmente las transformaciones de las pequeñas moléculas y la movilización del potencial químico. La química celular comprende otro nivel de síntesis: el de las macromoléculas, ácidos nucleicos y proteínas (comprendiendo principalmente las mismas enzimas). Se sabe desde hace tiempo que a este nivel funcionan igualmente sistemas regu-

5. J. Monod, J. Wyman, y J.-P. Changeux, «Journal of Molecular Biology», 12, págs. 88-118 (1965).

ladores. El estudio es mucho más difícil que el de las enzimas alostéricas, y de hecho uno solo de ellos ha podido, hasta el presente, ser casi totalmente analizado. Lo tomaremos como ejemplo.

Este sistema (llamado «sistema lactosa») gobierna la síntesis de tres proteínas en la bacteria *Escherichia coli.* Una de estas proteínas (la galactósido-permeasa) permite a los galactósidos[6] penetrar y acumularse en el interior de las células, cuya membrana, en ausencia de esta proteína, es impermeable a estos azúcares. Una segunda proteína hidroliza los β-galactósidos (ver capítulo 3). La función de la tercera proteína es sin duda menor; no está del todo interpretada. Las dos primeras, por el contrario, son simultáneamente indispensables para la utilización metabólica de la lactosa (y otros galactósidos) por las bacterias.

Cuando éstas crecen en un medio desprovisto de galactósidos, las tres proteínas son sintetizadas a un ritmo apenas mesurable, correspondiendo a una molécula cinco generaciones por término medio. Casi inmediatamente (en dos minutos aproximadamente) después de la adición de un galactósido (llamado en esta circunstancia «inductor») al medio, el ritmo de síntesis de las tres proteínas aumenta en un factor 1000, y se mantiene a este valor mientras que el inductor está presente. Si el inductor se retira, el ritmo de síntesis vuelve a su valor inicial en el espacio de dos a tres minutos.

Las conclusiones del análisis de este fenómeno, maravillosa y casi milagrosamente teleonómico,[7] están resumidas por el esquema de la figura 4.

Se excluye aquí la discusión de la parte derecha del esquema que representa las operaciones de síntesis del RNA «mensajero» y su «traducción» en secuencias polipeptídicas. Retengamos solamente que el mensajero, pese a tener una vida muy corta (del orden de algunos minutos), determina por su ritmo de síntesis el ritmo de síntesis de las tres proteínas. Nos interesamos esencialmente por los componentes del sistema regulador. Éstos comprenden:

—el gen «regulador» (i)
—la proteína-represor (R)
—el segmento «operador» (o) del ADN

6. Ver capítulo 3, pág. 59.
7. El investigador finés Karstrom, que había en los años 30 aportado contribuciones notables al estudio de estos fenómenos, abandonó a continuación la investigación, parece ser que para hacerse monje.

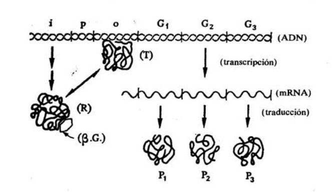



*Fig. 4. Regulación de la síntesis de las enzimas del «sistema lactosa»*

R: Proteína-represor, en el estado asociado al galactósido inductor, representado por un hexágono.
T: Proteína-represor en el estado asociado al segmento operador (o) del ADN.
i: «Gen regulador» gobernando la síntesis del represor.
p: Segmento «promotor», punto de partida de la síntesis del RNA mensajero (mRNA).
$G_1$, $G_2$, $G_3$: Gen de «estructura» que gobierna la síntesis de las tres proteínas del sistema, $P_1$, $P_2$, $P_3$. (Ver texto en página siguiente.)

—el segmento «promotor» (p) del ADN
—una molécula de galactósido inductor (βG)
El funcionamiento es el siguiente:

a) el gen regulador dirige la síntesis, a ritmo constante y muy débil, de la proteína-represor;

b) el represor reconoce específicamente el segmento operador al cual se asocia en un complejo muy estable (correspondiente a un $\Delta$ F de cerca 15 kcal);

c) en este estado la síntesis del mensajero (implicando la intervención de la enzima RNA-polimerasa) está bloqueada, verosímilmente por simple impedimento estérico, ya que el inicio de esta síntesis tiene lugar obligatoriamente al nivel del promotor;

d) el represor reconoce igualmente los β-galactósidos, pero no se asocia firmemente más que en *estado libre;* en presencia de β-galactósidos, por consecuencia, el complejo operador-represor

se disocia, permitiendo la síntesis del mensajero, o sea de las proteínas.[8]

Es preciso subrayar que las dos interacciones del represor son reversibles y no covalentes y que el inductor, particularmente, no es modificado por su asociación con el represor. Así, la lógica de este sistema es de una extrema simplicidad: el represor inactiva la transcripción; él es a su vez inactivado por el inductor. De esta doble negación resulta un efecto positivo, una «afirmación». Se puede observar que la lógica de esta negación de la negación no es dialéctica: no desemboca en una proposición nueva, sino en la simple reiteración de la proposición original, escrita en la estructura del ADN, en conformidad con el código genético. La lógica de los sistemas biológicos de regulación no obedece a la de Hegel, sino al álgebra de Boole, como la de las calculadoras.

Se conoce hoy (en las bacterias) un gran número de sistemas análogos a éste. Ninguno de ellos ha sido, hasta el presente, enteramente «desmontado». Parece muy probable, sin embargo, que la lógica de algunos de estos sistemas sea más complicada que la del sistema «lactosa», no comportando en especial y de forma exclusiva interacciones negativas. Pero las nociones más generales y más significantes que se pueden extraer del «sistema lactosa» son válidas también para estos otros sistemas. Estas nociones son las siguientes:

a) El represor, desprovisto por él mismo de toda actividad, es un puro mediador (transductor) de señales químicas.

b) El efecto del galactósido sobre la síntesis de la enzima es totalmente indirecto, debido exclusivamente a las propiedades de reconocimiento del represor y al hecho que dos estados, exclusivos uno del otro, le son accesibles. Se trata pues claramente de una interacción alostérica en el sentido del esquema general discutido más arriba.

c) No hay ninguna relación *químicamente necesaria* entre el hecho de que la β-galactosidasa hidrolice los β-galactósidos, y el hecho de que su biosíntesis sea inducida por los mismos cuerpos. Fisiológicamente útil, «racional», esta relación es químicamente arbitraria. Se puede llamar «gratuita».

8. F. Jacob y J. Monod, «Journal of Molecular Biology», 8, págs. 318-356 (1961). Cf. igualmente «The lactose operon», *Cold Spring Harbour Monograph* (1970), J. R. Beckwith y David Zipser, Edit.

*La noción de gratuidad*

Esta noción fundamental de gratuidad, es decir de independencia química entre la misma función y la naturaleza de las señales químicas a las que está subordinada, se aplica a las enzimas alostéricas. En este caso, una única molécula de proteína desempeña a la vez la función catalítica específica y la función reguladora. Pero, como se ha visto, las interacciones alostéricas son indirectas, debidas exclusivamente a las propiedades diferenciales de reconocimiento estereoespecífico de la proteína en los dos (o varios) estados que le son accesibles. Entre el substrato de una enzima alostérica y los ligandos que activan o inhiben su actividad, no existe ninguna relación *químicamente necesaria* de estructura o de reactividad. La especificidad de las interacciones es, en definitiva, independiente de la estructura de los ligandos: es debida enteramente a la de la proteína en los diversos estados que le son accesibles, estructura a su vez, libremente, arbitrariamente *dictada* por la de un gen.

Así resulta, y éste es el punto fundamental, que por lo que atañe a la regulación por el intermediario de una proteína alostérica *todo es posible*. Una proteína alostérica debe ser considerada como un producto especializado de «ingeniería» molecular, permitiendo a una interacción, positiva o negativa, establecerse entre cuerpos desprovistos de afinidad química y así subordinar una reacción cualquiera a la intervención de compuestos químicamente extraños e indiferentes a esta reacción. El principio operatorio de las interacciones alostéricas autoriza pues una entera libertad en la «elección» de los subordinados que, escapando a todo apremio químico, podrán obedecer exclusivamente a los apremios fisiológicos en virtud de los que serán seleccionados según el aumento de coherencia y de eficacia que confieren a la célula o al organismo. Es en definitiva la *gratuidad* misma de estos sistemas que, abriendo a la evolución molecular un campo prácticamente infinito de exploración y de experiencias, le ha permitido construir la inmensa red de interconexiones cibernéticas que hacen de un organismo una unidad funcional autónoma, de la que las *performances* parecen transcender las leyes de la química, sino incluso escapar de ellas.

De hecho, como se ha visto, cuando estas *performances* son analizadas a escala microscópica, molecular, aparecen enteramente interpretables en términos de interacciones químicas específicas, electivamente aseguradas, libremente escogidas y organi-

zadas por proteínas reguladoras; y es en la estructura de estas moléculas donde es preciso ver la fuente última de la autonomía, o más exactamente de la autodeterminación que caracteriza a los seres vivos en sus *performances*.

Los sistemas que hemos estudiado hasta aquí son de los que coordinan la actividad de la célula y hacen de ella una unidad funcional. En los organismos pluricelulares, sistemas especializados aseguran la coordinación entre células, tejidos u órganos: se trata no sólo del sistema nervioso y del sistema endocrino, sino también de las interacciones directas entre células. No abordaré aquí el análisis del funcionamiento de estos sistemas que escapa aún, casi enteramente, a la descripción microscópica. Admitiremos, sin embargo, la hipótesis que, en estos sistemas, las interacciones moleculares que aseguran la transmisión y la interpretación de las señales químicas son debidas a proteínas dotadas de propiedades de reconocimiento estereoespecíficas diferenciales, a las que se aplica el principio esencial de gratuidad química, tal como se desprende del estudio de las interacciones alostéricas propiamente dichas.

### «*Holismo*» *y reduccionismo*

Cabría quizá, para concluir este capítulo, volver de nuevo sobre la antigua disputa entre «reduccionistas» y «organicistas». Se sabe que ciertas escuelas del pensamiento (todas más o menos conscientemente o confusamente influenciadas por Hegel) niegan el valor del acceso *analítico* cuando se trata de sistemas tan complejos como los seres vivos. Según estas escuelas («organicistas» u «holistas») que, como el fénix, renacen en cada generación,[9] la actitud analítica, calificada de «reduccionista», sería completamente estéril, como pretendiendo recoger pura y simplemente las propiedades de una organización muy compleja en la «suma» de sus partes. Es una querella estúpida, que atestigua solamente, en los «holistas», un profundo desconocimiento del método científico y del papel esencial que en él juega el análisis. ¿Podemos acaso concebir que un ingeniero marciano, queriendo interpretar el funcionamiento de una calculadora terrestre, pueda llegar a algún resultado si rehúsa, por principio, disecar los com-

9. Cf. *Beyond reductionism*, Koestler y Smythies, Ed. Hutchinson, Londres, 1969.

ponentes electrónicos de base que efectúan las operaciones de álgebra proposicional? Si hay un dominio de la biología molecular que ilustre más que otros la esterilidad de las tesis organicistas por oposición al poderío del método científico, es desde luego el estudio de esta cibernética microscópica brevemente entrevisto en el curso de este capítulo.

El análisis de las interacciones alostéricas muestra, para empezar, que las *performances* teleonómicas no son el atributo exclusivo de sistemas complejos, de componentes múltiples, ya que *una* molécula de proteína se muestra ya capaz, no sólo de activar electivamente una reacción, sino de regular su actividad en función de *varias* informaciones químicas.

Vemos, en segundo lugar, gracias a la noción de gratuidad, cómo y por qué estas interacciones reguladoras moleculares, escapando a los apremios químicos, han podido ser selectivamente escogidas en razón exclusivamente de su participación en la coherencia del sistema.

El estudio de estos sistemas microscópicos nos revela, en fin, que la complejidad, la riqueza y la potencia de la red cibernética, en los seres vivos, sobrepasan con mucho lo que el estudio de las solas *performances* globales de los organismos podría jamás dejar entrever. E incluso cuando esos análisis están lejos aún de suministrar una descripción completa del sistema cibernético de la célula más simple, revelan que todas las actividades, sin excepción, que concurren al crecimiento y a la multiplicación de esta célula están, directamente o no, subordinadas unas a otras.

Es sobre estas bases, y no sobre la de una vaga «teoría general de los sistemas»,[10] que nos es posible comprender en qué sentido, muy real, el organismo trasciende, en efecto, aunque observándolas, las leyes físicas para no ser más que persecución y cumplimiento de su propio proyecto.

10. Von Bertalanfy, in Koestler, *loc. cit.*

# 5

# Ontogénesis molecular

Los seres vivos, tanto por sus estructuras macroscópicas como por sus funciones, son, lo hemos visto, estrechamente comparables a las máquinas. Difieren radicalmente, por el contrario, por su modo de construcción. Una máquina, un artefacto cualquiera, debe su estructura macroscópica a la acción de fuerzas exteriores, de útiles que actúan sobre una materia para imponerle su forma. Es el cincel del escultor el que arranca del mármol las formas de Afrodita; pero la diosa, no su imagen, nació de la espuma de las olas (fecundadas por el órgano sangrante de Urano) de donde su cuerpo creció de sí mismo, por sí mismo.

Querría, en este capítulo, mostrar que este proceso de morfogénesis espontánea y autónoma reposa, en último lugar, en las propiedades de reconocimiento estereoespecífico de las proteínas, que es pues de orden microscópico, antes de manifestarse en estructuras macroscópicas. Buscaremos, en conclusión, en las estructuras primarias de las proteínas el «secreto» de estas propiedades cognitivas que convierten a los demonios de Maxwell en animadores y constructores de los sistemas vivientes.

Es preciso subrayar, en primer lugar, que los problemas que ahora abordamos, los de la mecánica del desarrollo, plantean aún a la biología profundos enigmas. Porque si la embriología ha aportado admirables descripciones del desarrollo, se está aún lejos de saber analizar la ontogénesis de las estructuras macroscópicas en términos de interacciones microscópicas. Por el contrario, la construcción de ciertos edificios moleculares está hoy bastante bien comprendida y me gustaría mostrar que se trata de un verdadero proceso «de ontogénesis molecular» donde se revela la esencia física del fenómeno.

He tenido ya ocasión de recordar que las proteínas globulares se presentan a menudo bajo forma de agregados conteniendo un número finito de subunidades químicamente idénticas. El número de las subunidades constituyentes, siendo generalmente pequeño, permite llamar a estas proteínas «oligómeros». En estos oligómeros, las subunidades (protómeros) están asociadas exclusivamente por uniones no covalentes. Además, como ya se ha visto, el orden de los protómeros en el seno de una molécula oligomérica es tal que cada uno de ellos es equivalente, geométricamente, a cada uno de los otros. Esto entraña necesariamente que cada protómero pueda ser convertido en cualquiera de los otros por una operación de simetría, de hecho por una rotación. Se demuestra fácilmente que los oligómeros así constituidos poseen los elementos de simetría de uno de los grupos puntuales de rotación.

Estas moléculas constituyen, pues, verdaderos cristales microscópicos, pero pertenecientes a una clase particular que yo llamaría la de los «cristales cerrados» porque, contrariamente a los cristales propiamente dichos (construidos según uno de los grupos de espacio), no pueden crecer sin adquirir nuevos elementos de simetría, todo y perdiendo (en general) algunos de los que poseían.

### *La asociación espontánea de las subunidades en las proteínas oligoméricas*

Hemos visto ya, en fin, que ciertas propiedades funcionales de estas proteínas están asociadas a su estado oligomérico y a su estructura simétrica. La construcción de estos edificios microscópicos plantea pues un problema biológicamente significante, al mismo tiempo que físicamente interesante.

Como los protómeros, en una molécula oligométrica, no están asociados más que por uniones no covalentes, es a menudo posible, por tratamientos muy moderados (no implicando, por ejemplo, la presencia de agentes químicos agresivos o el alcance de temperaturas elevadas), disociarlos en unidades monoméricas. En este estado, la proteína ha perdido en general todas sus propiedades funcionales, catalíticas o reguladoras. Luego, y éste es el punto importante, cuando las condiciones iniciales «normales» son restituidas (por eliminación del agente disociante), se constata en general que los agregados oligoméricos se reforman

espontáneamente, con restauración completa del estado «nativo»: mismo número de protómeros, misma simetría, acompañada de la reaparición integral de las propiedades funcionales.

Además, la reasociación de subunidades perteneciendo a una misma especie proteínica no se produce sólo en una solución conteniendo esta única proteína. Ella tiene lugar, igualmente, en mezclas complejas conteniendo centenas, si no millares, de otras proteínas. Prueba que hay, una vez más, un proceso de reconocimiento de una extrema especificidad, evidentemente debido a la formación de complejos estéricos no covalentes asociando los protómeros entre sí. Proceso que es legítimo considerar como *epigenético,*[1] ya que a partir de una solución de moléculas monoméricas, desprovistas de toda simetría, han aparecido moléculas mayores y de un grado de orden superior que, del mismo golpe, han adquirido propiedades funcionales, antes totalmente ausentes.

Lo esencial, para lo que aquí nos interesa, es el *carácter espontáneo* de este proceso de epigénesis molecular. Espontáneo en dos sentidos.

1. El potencial químico necesario para la formación de los oligómeros no ha de ser inyectado en el sistema: se debe considerar que está presente en la solución de monómeros.

2. Termodinámicamente espontáneo, el proceso lo es de la misma manera cinéticamente: ningún catalizador es requerido para activarlo. Esto gracias, evidentemente, al hecho de que las uniones empleadas son no covalentes. Hemos ya subrayado la extrema importancia del hecho de que la formación, como la ruptura, de tales uniones no pone en juego más que energías de activación casi nulas.

1. Se sabe que la aparición de estructuras y de propiedades nuevas en el curso del desarrollo embrionario ha sido a menudo calificada de proceso «epigenético», como testimoniando un enriquecimiento gradual del organismo a partir de la pura entrega genética, representada por el huevo inicial. El adjetivo es a menudo empleado en referencia a teorías, hoy superadas, que oponían los «preformacionistas» (que creían que el huevo contenía una miniatura del animal adulto) a los epigenetistas (que creían en un enriquecimiento *real* de la información inicial). Empleo aquí este término para calificar, sin referencia a ninguna teoría, todo proceso de desarrollo estructural y funcional.

Todas estas observaciones son relativamente recientes, y se pueden esperar progresos importantes en este dominio de la investigación, desembocando en la reconstitución *in vitro* de orgánulos celulares cada vez más complejos, tales como mitocondrias o membranas, por ejemplo. Los casos a los que hemos pasado aquí revista bastan sin embargo para ilustrar el proceso por el que estructuras complejas, a las que están ligadas propiedades funcionales, son construidas por el ensamblaje estereoespecífico, *espontáneo,* de sus constituyentes proteínicos. Hay «aparición» de orden, diferenciación estructural, adquisición de funciones a partir de una mezcla desordenada de moléculas individualmente desprovistas de toda actividad, de toda propiedad funcional intrínseca que no sea reconocer los compañeros con los que van a constituir la estructura. Y si no se puede, para los ribosomas o los bacteriófagos, hablar de cristalización, ya que estas partículas son de un grado de complejidad, es decir de orden, muy superior al que caracteriza un cristal, no deja de ser cierto que, en el fondo, las interacciones químicas puestas en juego son de la misma naturaleza que las que construyen un cristal molecular. Como en un cristal, es la estructura misma de las moléculas ensambladas lo que constituye la fuente de «información» para la construcción del conjunto. La esencia de estos procesos epigenéticos consiste pues en que la organización de conjunto de un edificio multimolecular complejo está contenido en potencia en la estructura de sus constituyentes, pero no se revela, ni deviene *actual* más que por su ensamblaje.

Este análisis se ve reducido a una disputa verbal, desprovista de todo interés: la antigua querella de los preformacionistas y de los epigenistas. La estructura acabada no estaba en ninguna parte, como tal, preformada. Pero el plan de la estructura estaba presente en sus mismos constituyentes. Ella puede pues realizarse de forma autónoma y espontánea, sin intervención exterior, sin inyección de nueva información. La información estaba presente, pero sin expresar, en los constituyentes. La construcción epigenética de una estructura no es una *creación,* es una *revelación.*

extracts of mutant infected cells», «Proceedings of the National Academy of Science», 55, 498 (1966).

Que esta concepción, directamente fundamentada sobre el estudio de la formación de edificios microscópicos, pueda y deba igualmente rendir cuenta de la epigénesis de las estructuras macroscópicas (tejidos, órganos, miembros, etc.), es algo que los modernos biólogos no dudan, aun reconociendo que se trata de una extrapolación a la que faltan todavía las verificaciones directas. Estos problemas se plantean en efecto a otra escala, no sólo en dimensiones, sino en complejidad. Las interacciones constructivas más importantes en esta escala tienen lugar no entre componentes moleculares, sino entre células. Se ha podido ver que células aisladas de un mismo tejido son efectivamente capaces de reconocerse entre ellas, diferencialmente, y de juntarse. Sin embargo, se ignora todavía cuáles son los componentes o las estructuras que identifican las células unas respecto a otras. Todo lleva a creer que se trata de estructuras características de las membranas celulares. Pero no se sabe si estos elementos de reconocimiento son estructuras moleculares tomadas individualmente o redes multimoleculares de superficie.[5] Sea lo que sea, e incluso si se trata de redes que no están constituidas exclusivamente por proteínas, la estructura de tales redes tendrá necesariamente, en último caso, que ser determinada por las propiedades de reconocimiento de sus constituyentes proteínicos, así como por las de las enzimas responsables de la biosíntesis de los otros componentes de la red (polisacáridos o lípidos, por ejemplo).

Por tanto, es posible que las propiedades «cognitivas» de las células no sean la manifestación directa de las facultades discriminativas de algunas proteínas, pero no expresan estas facultades más que por vías muy apartadas. Lo que no impide que la construcción de un tejido o la diferenciación de un órgano, fenómeno macroscópico, deban ser considerados como la resultante integrada de interacciones microscópicas múltiples debidas a proteínas, y reposando sobre sus propiedades de reconocimiento estereoespecífico, por formación *espontánea* de complejos no covalentes.

Mas es preciso reconocer que esta «reducción a lo microscó-

5. J.-P. Changeux, en «Symmetry and function in biological systems at the macromolecular level», A. Engström y B. Strandberg, edit., «Nobel Symposium», N.º 11, págs. 235-256 (1969), John Wiley y Sons Inc., Nueva York.

pico» de los fenómenos de la morfogénesis no constituye, por el momento, una verdadera teoría de estos fenómenos. Se trata más bien de una posición de principio que especifica solamente los términos en los que una teoría así debería ser formulada para que se pueda considerar como aportando más que una simple descripción fenomenológica. Este principio define el fin a alcanzar, pero no ilumina más que débilmente la vía a seguir para conseguirlo. Piénsese en el formidable problema que representa la interpretación, a escala molecular, del desarrollo de un aparato tan complejo como el sistema nervioso central, en el que miles de millones de interconexiones específicas entre células deben ser realizadas, algunas a distancias relativamente considerables.

Este problema de las influencias, de las orientaciones a distancia, es sin duda el más difícil y el más importante de la embriología. Los embriólogos, para explicar con facilidad los fenómenos de regeneración, han introducido la noción de «campo morfogenético» o de «gradiente». Noción que parece al principio sobrepasar de lejos la de interacción estereoespecífica a escala de algunos Angström. Resulta, sin embargo, que esta última es la única en presentar un sentido físico preciso, y que no es del todo inconcebible que tales interacciones, multiplicadas y repetidas progresivamente, puedan crear o definir una organización a escala milimétrica, o centimétrica por ejemplo. Es en este sentido que se orienta la embriología moderna. Es bastante verosímil que la noción de interacciones estereoespecíficas puramente *estáticas* resulte insuficiente para la interpretación del «campo» o de los gradientes morfogenéticos. Será preciso enriquecerla de hipótesis cinéticas, análogas quizás a las que permiten la interpretación de las interacciones alostéricas. Pero yo sigo convencido, por mi parte, que sólo las propiedades asociativas estereoespecíficas de las proteínas podrán, en último lugar, dar la clave de estos fenómenos.

## *Estructura primaria y estructura globular de las proteínas*

Cuando se analizan las funciones catalíticas o reguladoras o epigenéticas de las proteínas, se es llevado a reconocer que todas, y ante todo, reposan sobre las propiedades asociativas estereoespecíficas de estas moléculas.

Según la concepción expuesta en este capítulo, como en los dos precedentes, todas las *performances* y todas las estructuras

teleonómicas de los seres vivos son, al menos en principio, analizables en estos términos. Si esta concepción es adecuada —y no hay razón para dudar que lo sea— resta pues, para resolver la paradoja de la teleonomía, explicar el modo de formación y los mecanismos de evolución de las estructuras asociativas estereoespecíficas de las proteínas. No examinaré aquí más que el modo de formación de estas estructuras, reservando la cuestión de su evolución para los próximos capítulos. Espero mostrar que el análisis detallado de estas estructuras moleculares que, en suma, guardan el «secreto» último de la teleonomía, conduce a conclusiones profundamente significantes.

Para empezar, es necesario recordar que la estructura en el espacio de una proteína globular (cf. Apéndice, pág. 171) está determinada por dos tipos de uniones químicas.

1. La estructura llamada «primaria» está constituida por una secuencia topológicamente lineal de radicales de aminoácidos asociados por uniones covalentes. Estas uniones definen pues una estructura fibrosa, extremadamente flexible, y capaz de tomar, en teoría, una infinidad de conformaciones.

2. Pero la conformación llamada «nativa» de una proteína globular, está además estabilizada por un gran número de interacciones no covalentes que asocian entre ellas los radicales de aminoácidos repartidos a lo largo de la secuencia covalente topológicamente lineal. De ello resulta que la fibra polipeptídica está plegada sobre ella misma de manera muy compleja, en una pelota pseudoglobular, compacta. Son, en definitiva, estos pliegues complejos los que determinan la estructura en el espacio de la molécula, comprendida la forma precisa de las áreas de asociación estereoespecífica por la que la molécula ejerce su función de reconocimiento. Es, pues, como se ve, la suma, o mejor la cooperación de un gran número de interacciones no covalentes que estabilizan la estructura funcional, lo que permite a la proteína formar electivamente complejos estereoespecíficos (igualmente no covalentes) con otras moléculas.

La cuestión que aquí nos interesa es la ontogénesis, el modo de formación de esta conformación particular, única, a la que está ligada la función cognitiva de una proteína. Se ha podido creer, durante mucho tiempo, que en razón de la complejidad misma de estas estructuras y del hecho de que ellas están estabilizadas por interacciones no covalentes, individualmente muy lábiles, un gran número de conformaciones distintas serían accesibles a una misma fibra polipeptídica. Pero todo un conjunto de

observaciones debía mostrar que de hecho una misma especie química (definida por la estructura primaria) no existe en el estado nativo, en las condiciones fisiológicamente normales, más que en una sola conformación (o todo lo más, en un pequeñísimo número de estados distintos, poco distantes unos de otros, como es el caso de las proteínas alostéricas). Conformación muy precisamente definida, como lo prueba el hecho de que los cristales de proteínas dan excelentes imágenes de difracciones de rayos X, lo que significa que la posición de la gran mayoría de los millares de átomos que componen una molécula está fijada con un error de sólo algunas fracciones de Angström. Señalemos, además, que esta uniformidad, como esta precisión de estructura, son la condición misma de la especificidad de asociación, propiedad biológicamente esencial de las proteínas globulares.

### *Formación de las estructuras globulares*

El mecanismo de formación de estas estructuras está, en el presente, bastante bien conocido en su principio. Se sabe en efecto:

1. que el determinismo genético de las estructuras de proteínas *especifica exclusivamente la secuencia* de los radicales aminoácidos que corresponden a una proteína dada;

2. que la fibra polipeptídica así sintetizada se pliega *espontáneamente* y de forma *autónoma* para concluir en la conformación pseudoglobular, funcional.

Así, entre los millares de conformaciones plegadas, en principio accesibles a la fibra polipeptídica, una sola es de hecho escogida y realizada. Se trata, como se ve, de un verdadero proceso epigenético, al nivel más simple posible: el de una macromolécula aislada. A la fibra desplegada, le son accesibles millares de conformaciones. Ella está, por otra parte, desprovista de toda actividad biológica, especialmente de toda capacidad de reconocimiento estereoespecífico. En la forma plegada, por el contrario, un solo estado le es accesible, que corresponde por consecuencia a un nivel de orden muy superior. Es en este estado, exclusivamente, que es conferida la actividad funcional.

La explicación de este pequeño milagro de epigénesis molecular es relativamente simple en su principio.

1. En el medio fisiológicamente normal, es decir, en fase acuosa, las formas plegadas de la proteína son termodinámica-

mente más estables que las formas desplegadas. La razón de esta diferencia de estabilidad es muy interesante; es importante precisarla. Entre los radicales aminoácidos que constituyen la secuencia, la mitad aproximadamente son «hidrófobos», es decir, se comportan como el aceite en el agua, tienden a juntarse liberando las moléculas de agua inmovilizadas a su contacto. Por este hecho, la proteína toma una estructura compacta, inmovilizando, por contacto recíproco, los radicales que componen la fibra, de donde, para las proteínas, una ventaja de orden (o de entropía negativa) compensada por la expulsión de moléculas de agua, que, *liberadas,* van a acrecentar el desorden, es decir, la entropía del sistema.

2. Entre las diferentes estructuras plegadas accesibles a una secuencia polipeptídica dada, una sola, o un pequeñísimo número de ellas, permiten la realización de la estructura más compacta posible. Esta estructura será pues privilegiada a expensas de todas las demás. Digamos, simplificando un poco, que será «escogida» la que correspondía a la expulsión de un máximo de moléculas de agua. Evidentemente, es de la posición relativa, es decir de la secuencia de los radicales aminoácidos en la fibra (comenzando por los radicales hidrófobos) que dependerán las diferentes posibilidades de realización de estructuras compactas. La conformación globular particular en una proteína dada y de la que depende su actividad funcional será pues de hecho *impuesta* por la secuencia de los radicales en la fibra. Sin embargo, y éste es el punto importante, la cantidad de información que sería necesaria para especificar enteramente la estructura tridimensional de una proteína es *mucho más grande* que la información definida por la misma secuencia. Por ejemplo, para un polipéptido de cien aminoácidos, la información (H) necesaria para la definición de la secuencia, correspondería a unos 2.000 bits ($H = \log_2 20^{100}$), mientras que para definir la estructura tridimensional sería preciso, a este número, añadirle aún una gran cantidad de información, difícilmente calculable además (digamos 1.000 a 2.000 bits, al menos).

### *La falsa paradoja del «enriquecimiento» epigenético*

Se puede ver, pues, una contradicción en el hecho de decir que el genoma «define enteramente» la función de una proteína,

mientras que esta función está ligada a una estructura tridimensional cuyo contenido informativo es *más rico* que la contribución directamente aportada a esta estructura por el determinismo genético. Esta contradicción no ha dejado de ser realzada por ciertos críticos de la teoría biológica moderna. Especialmente Elsässer, quien ve precisamente en el desarrollo epigenético de las estructuras (macroscópicas) de los seres vivos un fenómeno físicamente inexplicable, en razón del «enriquecimiento sin causa» que él parece testimoniar.

Esta objeción desaparece cuando se examinan con detalle los mecanismos de la epigénesis molecular: el enriquecimiento de información, correspondiente a la formación de la estructura tridimensional, proviene de lo que la información genética (representada por la secuencia) expresa de hecho en condiciones iniciales bien definidas (en fase acuosa, entre ciertos límites, estrechos, de temperaturas, composición iónica, etc.), tales que, entre todas las estructuras posibles, una sola de ellas es de hecho realizable. Las condiciones iniciales, en consecuencia, contribuyen a la información finalmente encerrada en la estructura globular, sin por otra parte especificarla, sino solamente eliminando las demás estructuras posibles, proponiendo así, o más bien imponiendo, una interpretación unívoca de un mensaje *a priori* parcialmente equívoco.

* * *

En el proceso de estructuración de una proteína globular, se puede ver, pues, a la vez, la imagen microscópica y la fuente del desarrollo epigenético autónomo del organismo. Desarrollo en el que se pueden reconocer varias etapas o niveles sucesivos.

1. Pliegue de las secuencias polipeptídicas para dar las estructuras globulares, provistas de las propiedades asociativas estereoespecíficas.

2. Interacciones asociativas entre proteínas (o entre proteínas y algunos otros constituyentes) para formar los orgánulos celulares.

3. Interacciones entre células, para constituir tejidos y órganos.

4. En todas estas etapas, coordinación y diferenciación de las actividades químicas, por interacciones de tipo alostérico.

En cada una de estas etapas aparecen estructuras de orden superior y funciones nuevas que, resultando de las interacciones

espontáneas entre productos de la etapa precedente, revelan, como en un fuego de artificio de varios pisos, las potencialidades latentes de los niveles anteriores. Todo el determinismo del fenómeno encuentra su fuente, en definitiva, en la información genética representada por la suma de las secuencias polipeptídicas interpretadas, o más exactamente filtradas, por las condiciones iniciales.

## *La* ultima ratio *de las estructuras teleonómicas*

La *ultima ratio* de todas las estructuras y *performances* teleonómicas de los seres vivos está, pues, encerrada en las secuencias de radicales de las fibras polipeptídicas, «embriones» de estos demonios biológicos de Maxwell que son las proteínas globulares. En un sentido, muy real, es a este nivel de organización química donde yace, si es que hay uno, el secreto de la vida. Y sabiendo no sólo describir estas secuencias, sino enunciar la ley de ensamblaje a la que ellas obedecen, se podría decir que el secreto ha sido penetrado, la *ultima ratio* descubierta.

La primera secuencia completa de una proteína globular fue descrita en 1952 por Sanger. Esto fue a la vez una revelación y una decepción. En esta secuencia en la que se sabía definir la estructura, o sea las propiedades electivas de una proteína funcional (la insulina), ninguna regularidad, ninguna singularidad, ninguna restricción se revelaba. Aunque, sin embargo, se puede esperar que, a medida que se acumulen documentos de este tipo, algunas leyes generales de ensamblaje, así como ciertas correlaciones funcionales, se harán más claras. Se conocen hoy en día centenares de secuencias, correspondientes a distintas proteínas, extraídas de los organismos más diversos. De estas secuencias, y de su comparación sistemática ayudada por los modernos medios de análisis y de cálculo, se puede hoy deducir la ley general: la del azar. Para ser precisos: estas estructuras están «al azar» en el sentido que, conociendo exactamente el orden de 199 residuos en una proteína que comprende 200, es imposible formular ninguna regla, teórica o empírica, que permita prever la naturaleza del único residuo no identificado aún por el análisis.

Decir de la secuencia de los aminoácidos en un polipéptido que está «al azar» no agrega nada, hay que insistir sobre ello, a una declaración de ignorancia; sino que expresa una constata-

ción de hecho: por ejemplo, la frecuencia media con la cual el residuo está seguido de uno determinado en los polipéptidos es igual al *producto* de las frecuencias medias de cada uno de los dos residuos en las proteínas en general. Se puede ilustrar esto de otra forma. Supongamos un juego de cartas en el que cada una lleva el nombre de un aminoácido. Sea un paquete de doscientas cartas en el que la proporción *media* de cada aminoácido sería respetada. Después de haber barajado las cartas se obtendrían secuencias al azar, que nada permitiría distinguir de las secuencias efectivamente observadas en los polipéptidos naturales.

Pero si, en este sentido, toda estructura primaria de proteína nos aparece como el puro producto de una elección hecha al azar, en cada eslabón, entre los residuos disponibles, por el contrario en otro sentido, también muy significativo, es preciso reconocer que esta secuencia *actual* no ha sido sintetizada en modo alguno al azar, ya que este mismo orden está reproducido, prácticamente sin error, en todas las moléculas de la proteína considerada. No siendo así, sería imposible, de hecho, establecer por el análisis químico la secuencia de una población de moléculas.

Así, pues, es preciso admitir, que la secuencia «al azar» de cada proteína está de hecho reproducida, millares o millones de veces, en cada organismo, en cada célula, en cada generación, por un mecanismo de alta fidelidad que asegura la invariancia de las estructuras.

### *La interpretación del mensaje*

Se conocen hoy no sólo el principio, sino la mayoría de los componentes de este mecanismo. Se volverá sobre ello en un próximo capítulo. No es necesario conocer los detalles de este mecanismo para comprender la significación profunda del misterioso mensaje que constituye la secuencia de los radicales en una fibra polipeptídica. Mensaje que, según todos los criterios posibles, parece haber sido escrito al azar. Mensaje, sin embargo, cargado de un sentido que se revela en las interacciones discriminativas, funcionales, directamente teleonómicas, de la estructura globular, traducción a tres dimensiones de la secuencia lineal. Una proteína globular es ya, a escala molecular, una verdadera máquina por sus propiedades funcionales, pero no, lo vemos ahora, por su estructura fundamental, donde nada se dis-

cierne más que el juego de combinaciones ciegas. Azar captado, conservado, reproducido por la maquinaria de la invariancia y así convertido en orden, regla, necesidad. De un juego *totalmente* ciego, todo, por definición, puede salir, incluida la misma visión. En la ontogénesis de una proteína funcional, el origen y la filiación de la biosfera entera se reflejan, y la fuente última del proyecto que los seres vivos representan, persiguen y cumplen, se revela en este mensaje, en este texto preciso, fiel, pero esencialmente indescifrable que constituye la estructura primaria. Indescifrable, ya que antes de expresar la función fisiológicamente necesaria que él cumple espontáneamente, no revela en su estructura más que el azar de su origen. Pero tal es, justamente, el sentido más profundo de este mensaje que nos llega del fondo de las edades.

# 6

# Invariancia y perturbaciones

Desde su nacimiento, en las islas Jónicas, hace cerca de tres mil años, el pensamiento occidental se ha repartido entre dos actitudes en apariencia opuestas. Según una de esas filosofías, la realidad auténtica y última del universo no puede residir más que en formas perfectamente inmutables, invariantes por esencia. Según la otra, al contrario, es en el movimiento y la evolución donde reside la única realidad del universo.

*Platón y Heráclito*

De Platón a Whitehead, y de Heráclito a Hegel y Marx, es evidente que estas epistemologías metafísicas han estado siempre íntimamente asociadas a las ideas morales y políticas de sus autores. Estos edificios ideológicos, presentados como *a priori*, eran en realidad construcciones *a posteriori* destinadas a justificar una teoría ético-política preconcebida.[1]

El único *a priori*, para la ciencia, es el postulado de objetividad que le ahorra, o más bien le prohíbe, tomar parte en este debate. La ciencia estudia la evolución, sea la del universo o la de los sistemas que contiene, como el de la biosfera, comprendido el hombre. Sabemos que todo fenómeno, todo acontecimiento, todo conocimiento, implica interacciones, por sí mismas generadoras de modificaciones en los componentes del sistema.

1. Cf. Popper: *The Open Society and its Enemies*, Rutledge. Londres (1945).

Esta noción, sin embargo, no es en ningún modo incompatible con la idea que existe de las entidades inmutables en la estructura del universo. Más bien al contrario: la estrategia fundamental de la ciencia en el análisis de los fenómenos es el descubrimiento de los invariantes. Toda ley física, como además todo desarrollo matemático, especifica una relación de invariancia; las proposiciones más fundamentales de la ciencia son postulados universales de conservación. Es fácil ver, en todo ejemplo que se quiera escoger, que es de hecho imposible analizar un fenómeno cualquiera en otros términos que los de los invariantes conservados por este fenómeno. El ejemplo más claro es quizá la formulación de las leyes de la cinética, que *exigió* la invención de las ecuaciones diferenciales, es decir, de un medio para definir el cambio en términos de lo que permanece sin cambiar.

Se puede ciertamente preguntar si todas las invariancias, conservaciones y simetrías que constituyen la trama del discurso científico no son ficciones que substituyen a la realidad para dar una imagen operacional, vacía por una parte de substancia, pero que se vuelve accesible a una lógica fundada sobre un principio de identidad puramente abstracto, quizá «convencional». Convención de la que, sin embargo, la razón humana parece incapaz de abstenerse.

Menciono aquí este problema clásico para hacer notar que su estatuto ha sido profundamente modificado por la revolución cuántica. El principio de identidad no figura como postulado físico en la ciencia clásica. No es empleado más que como operación lógica, sin que sea necesario suponer que corresponde a una realidad substancial. La diferencia es absoluta por lo que respecta a la física moderna, de la que uno de los postulados fundamentales es la identidad *absoluta* de dos átomos que se encuentren en el mismo estado cuántico.[2] De ello proviene, igualmente, el valor de representación absoluta, no perfectible, otorgado a las simetrías atómicas y moleculares en teoría cuántica. Parece, pues, que hoy no se pueda restringir el principio de identidad al estatuto de simple regla para la conducta del espíritu: es preciso admitir que al menos a escala cuántica expresa una realidad substancial.

Sea cual sea, existe y existirá en la ciencia un elemento pla-

2. V. Weisskopf, en *Symmetry and Function in biological Systems at the macromolecular level*, Engström and Strandberg Ed., «Nobel Symposium» N.º 11, págs. 28, Wiley y Sons, Nueva York (1969).

tónico que no se podría extirpar sin arruinarla. En la diversidad infinita de los fenómenos singulares, la ciencia no puede buscar más que las invariantes.

## *Las invariantes anatómicas*

Había una ambición «platónica» en la búsqueda sistemática de las invariantes anatómicas a la que se consagraron los grandes naturalistas del siglo XIX, tras Cuvier (y Goethe). Quizá los biólogos modernos no siempre reconocen el genio de los hombres que, bajo la estupefaciente variedad de las morfologías y de los modos de vida de los seres vivos, supieron descubrir si no una «forma» única, al menos un número finito de planos anatómicos, cada uno de ellos invariante en el seno del grupo que él caracteriza. Sin duda no es muy difícil ver que las focas son mamíferos muy próximos a los carnívoros terrestres; pero lo es mucho más discernir un mismo plano fundamental en la anatomía de los tunicados y de los vertebrados, para agruparlos en la rama de los cordados. Y aún más difícil el percibir las afinidades entre los cordados y los equinodermos. Sin embargo, no hay duda alguna (la bioquímica lo confirma), que los erizos de mar son parientes más próximos nuestros, que los miembros de ciertos grupos más evolucionados, tales como los cefalópodos, por ejemplo.

Es gracias a estos inmensos trabajos, a la búsqueda de los planos fundamentales de organización, que ha sido levantado el edificio de la zoología clásica y de la paleontología, cuya estructura reclama y justifica a la vez la teoría de la evolución.

La diversidad de los tipos, sin embargo, permanecía, y era preciso reconocer que numerosos planos de organizaciones macroscópicas, radicalmente diferentes unos de otros, coexistían en la biosfera. Entre un alga azul, un infusorio, un pulpo y el hombre, por ejemplo, ¿qué hay de común? El descubrimiento de la célula y la teoría celular permitían entrever una nueva unidad bajo esta diversidad. Sin embargo, fue preciso esperar los avances de la bioquímica en el curso del segundo cuarto del siglo XX, principalmente, para que se revelara enteramente la profunda y rigurosa unidad, a escala microscópica, de todo el mundo viviente. Se sabe hoy en día que, desde la bacteria al hombre, la maquinaria química es esencialmente la misma, tanto por sus estructuras como por su funcionamiento.

1. En su estructura: todos los seres vivos, sin excepción, están constituidos de las mismas dos clases principales de macromoléculas: proteínas y ácidos nucleicos. Además, estas macromoléculas están formadas, en todos los seres vivos, por el ensamblaje de los mismos radicales, en número finito: veinte aminoácidos para las proteínas, cuatro tipos de nucleótidos para los ácidos nucleicos.

2. Por su funcionamiento: las mismas reacciones, o más bien secuencias de reacciones, son utilizadas en todos los organismos para las operaciones químicas esenciales: movilización y puesta en reserva del potencial químico, biosíntesis de los constituyentes celulares.

Ciertamente, en este tema central del metabolismo se encuentran numerosas variantes, que corresponden a diversas adaptaciones funcionales. Casi siempre, sin embargo, consisten en utilizaciones nuevas de secuencias metabólicas universales, primeramente empleadas en otras funciones. Por ejemplo, la excreción del nitrógeno se hace bajo formas diferentes en las aves y en los mamíferos. Las aves excretan ácido úrico, los mamíferos urea. O sea que la vía de síntesis del ácido úrico en las aves no es más que una pequeña modificación de la secuencia de reacciones que, en todos los organismos, sintetiza los nucleótidos llamados púricos (constituyentes universales de los ácidos nucleicos). La síntesis de la urea, en los mamíferos, es obtenida gracias a una modificación de una vía metabólica igualmente universal: la que culmina en la síntesis de la arginina, aminoácido presente en todas las proteínas. Podríamos multiplicar sin dificultad los ejemplos.

Es a los biólogos de mi generación a los que les ha sido revelada la casi identidad de la química celular en la biosfera entera. Desde 1950 la certidumbre era plena, y cada publicación nueva aportaba la confirmación. Las esperanzas de los «platónicos» más convencidos estaban más que satisfechas.

Pero esta revelación, gradual, de la «forma» universal de la química celular, parecía por otra parte hacer más agudo y más paradójico aún el problema de la invariancia reproductiva. Si, químicamente, los constituyentes son los mismos, y sintetizados por las mismas vías en todos los seres vivos, ¿cuál es la fuente de

su prodigiosa diversidad morfológica y fisiológica? Y más aún, ¿cómo cada especie, utilizando los mismos materiales y las mismas transformaciones químicas que todas las demás, mantiene, invariante a través de las generaciones, la norma estructural que la caracteriza y la diferencia de cualquier otra?

Poseemos hoy la solución de este problema. Los constituyentes universales que son por una parte los nucleótidos, y por otra los aminoácidos, son el equivalente lógico de un alfabeto con el que estaría la estructura, o sea las funciones asociativas específicas de las proteínas. Con este alfabeto puede por lo tanto ser escrita toda la diversidad de las estructuras de las *performances* que contiene la biosfera. Además, es la reproducción, *ne varietur,* en cada generación celular del texto escrito bajo forma de secuencia de nucleótidos en el ADN, que asegura la invariancia de la especie.

### *El ADN como invariante fundamental*

La invariante biológica fundamental es el ADN. Por ese motivo, la definición, por Mendel, del gen como portador invariante de los rasgos hereditarios, su identificación química por Avery (confirmada por Hershey) y la elucidación, por Watson y Crick, de las bases estructurales de su invariancia replicativa, constituyen sin ninguna duda los descubrimientos más fundamentales que hayan sido hechos jamás en biología. A los que es preciso añadir la teoría de la evolución selectiva que, además, no podía encontrar toda su significación y su certidumbre más que gracias a estos descubrimientos.

La estructura del ADN, cómo esta estructura da cuenta de su capacidad de dictar una copia exacta de la secuencia de nucleótidos de un segmento de ADN en una secuencia de aminoácidos en una proteína; todos estos hechos y nociones han sido amplia y excelentemente expuestos por los no especialistas. No los volveremos a tratar aquí en detalle.[3] El siguiente esquema, que simboliza solamente la esencia de los dos procesos de *replicación* y de *traducción* bastará básicamente para la presente discusión:

3. Ver Apéndice, pág. 175.

| | |
|---|---|
| ADN | Dos dobles secuencias idénticas |
| | ↑ *(replicación)* [4] |
| ADN | Doble secuencia de nucleótidos complementarios |
| | ↓ *(traducción)* |
| *Polipéptido* | Secuencia lineal de radicales de aminoácidos |
| | ↓ *(expresión)* |
| *Proteína globular* | Pliegue de la secuencia lineal de aminoácidos. |

El primer punto que conviene aclarar, es que el «secreto» de la replicación *ne varietur* del ADN reside en la *complementaridad estereoquímica* del complejo *no covalente* que constituyen las dos fibras asociadas en la molécula. Se ve, pues, que el principio fundamental de estereoespecifidad asociativa, que rinde cuenta de las propiedades discriminativas de las proteínas, está igualmente en la base de las propiedades replicativas del ADN. Pero en el ADN la estructura topológica del complejo es mucho más simple que en los complejos de proteínas, y esto es lo que permite funcionar a la mecánica de la replicación. En efecto, la estructura estereoquímica de una de las dos fibras está enteramente definida por la secuencia (la sucesión) de los radicales que la componen, en virtud del hecho de que *cada uno* de los cuatro radicales no es *individualmente* apareable (en razón de las restricciones estéticas), más que con *uno solo* de los otros tres. De ello resulta que:

1. la estructura estérica del complejo puede ser completamente representada en *dos dimensiones,* de las que una, finita, contiene en cada punto un par de nucleóticos mutuamente complementarios, mientras que la otra contiene una secuencia potencialmente infinita de estos pares;

2. teniendo una (cualquiera) de las dos fibras, podrá ser reconstituida la secuencia complementaria progresivamente por adiciones sucesivas de nucleótidos, siendo «elegido» cada uno por su compañero estéticamente predestinado. Es así como cada una de las dos fibras dicta la estructura de su complementaria para reconstituir el complejo entero.

La estructura global de la molécula de ADN es la más simple y la más probable que pueda adoptar una macromolécula constituida por la polimerización lineal de radicales parecidos: la de una fibra helicoidal, definida por dos operaciones de simetría,

4. Replicación = Réplica, en el sentido de repetición, de copia. Igual sentido para replicativo, replicado, etc. *(N. del T.)*

una traslación y una rotación. Se la puede considerar, pues, como un cristal fibrilar, en razón de la regularidad de la estructura de conjunto. Pero si se observa la estructura fina se verá que se trata de un cristal *aperiódico,* ya que la secuencia de los pares de bases no es repetitiva. Es importante subrayar que la secuencia es totalmente «libre», en el sentido que ninguna restricción es impuesta por la estructura de conjunto, que puede acomodarse a todas las secuencias posibles.

Como se acaba de ver, la formación de esta estructura es muy comparable a la de un cristal. Cada elemento de secuencia en una de las dos fibras representa el papel de un germen cristalino, que elige y orienta las moléculas que vienen espontáneamente a asociarse, asegurando el crecimiento del cristal. Dos fibras complementarias, artificialmente disociadas, reforman *espontáneamente* el complejo específico, escogiendo cada una, casi sin errores, su compañera entre millares o millones de secuencias.

Sin embargo, el crecimiento de cada fibra implica la formación de uniones *covalentes* que asocian secuencialmente los nucleótidos entre sí. La formación de estas uniones no puede tener lugar espontáneamente: le hace falta una fuente de potencial químico y un catalizador. La fuente de potencial está representada por ciertas uniones, presentes en los mismos nucleótidos, y que se rompen en el curso de la reacción de condensación. Ésta viene catalizada por una enzima, la ADN-polimerasa. Esta enzima es «indiferente» a la secuencia, especificada por la fibra preexistente. Ha sido probado, además, que la condensación de mononucleótidos activada por catalizadores no enzimáticos, es efectivamente dirigida por su apareo espontáneo con un polinucleótido preexistente.[5] Es cierto, sin embargo, que si la enzima no especifica la secuencia, contribuye a la precisión de la copia complementaria, es decir a la fidelidad del traspaso de información. Fidelidad extrema, como lo prueba la experiencia pero que, tratándose de un proceso microscópico, no puede ser absoluta. Volveremos pronto sobre este punto capital.

### *La traducción del código*

El mecanismo de la *traducción* de la secuencia de nucleótidos en secuencia de aminoácidos es mucho más complicado, en

5. L. Orgel «Journal of Molecular Biology», 38, págs. 381-393 (1968).

su principio mismo, que el de la *replicación*. Este último proceso se explica en definitiva, como se acaba de ver, por interacciones estereoespecíficas *directas* entre una secuencia polinucleotídica que sirve de matriz y los nucleótidos que vienen a asociarse. Igualmente en la traducción, son interacciones estereoespecíficas no covalentes las que aseguran la transferencia de información. Pero estas interacciones directrices comprenden varias etapas sucesivas, poniendo en juego varios constituyentes que reconocen cada uno, exclusivamente, su compañero funcional inmediato. Los constituyentes que intervienen al principio de esta cadena de transporte de información ignoran totalmente «lo que sucede» en el otro extremo. De suerte que, aunque es cierto que el código genético está escrito en un lenguaje estereoquímico, en el que cada letra está constituida por una secuencia de tres nucleótidos (un triplete) en el ADN, específicos para un aminoácido (entre veinte) en el polipéptido, no existe ninguna relación estérica directa entre el triplete codificante y el aminoácido codificado.

Esto entraña una conclusión muy importante: que este código, universal en la biosfera, parece químicamente *arbitrario*, en el sentido de que la transferencia de información podría perfectamente tener lugar según *otra* convención.[6] Se conocen además mutaciones que, alterando la estructura de algunos componentes del mecanismo de traducción, modifican la interpretación de algunos tripletes y cometen, pues (en relación con la convención reinante), errores muy perjudiciales al organismo.

El aspecto muy mecánico, e incluso «tecnológico», del proceso de traducción merece ser subrayado. Las interacciones sucesivas de los diferentes componentes que intervienen en cada etapa para desembocar en un polipéptido en vía de ensamblaje, residuo a residuo, en la superficie de un constituyente (el ribosoma) comparable a una máquina herramienta que hace avanzar muesca a muesca una pieza que va a ser conformada, hacen pensar irresistiblemente en la cadena de producción de una fábrica de mecánica.

En conjunto, en el organismo normal, esta mecánica microscópica de precisión confiere al proceso de traducción una notable fidelidad. Sin duda hay errores, pero tan poco probables que no se posee sobre su frecuencia normal media ninguna estadística utilizable. Suponiendo al código sin ambigüedad (para la traducción del ADN en proteínas), se deduce que la secuencia de

6. Se volverá sobre este punto en el capítulo 8.

los nucleótidos en un segmento de ADN define enteramente la secuencia de los aminoácidos en el polipéptido correspondiente. Como además, y ya se vio antes (capítulo 5), la secuencia del polipéptido especifica enteramente (en condiciones iniciales normales) la estructura doblada que adopta una vez constituido, la «interpretación» estructural, o sea funcional, de la información genética es unívoca, rigurosa. Ningún aporte suplementario de información (que no sea genético) es necesario, ni incluso parece posible; el mecanismo tal como se le conoce no deja lugar para ello. Y en la medida en que todas las estructuras y *performances* de los organismos son la resultante de las estructuras y actividades de las proteínas que los componen, se debe considerar que el organismo entero constituye la expresión epigenética última del mismo mensaje genético.

### *Irreversibilidad de la traducción*

Es preciso añadir, finalmente, y este punto es de una gran importancia, que *el mecanismo de la traducción es estrictamente irreversible.* Ni se ha observado, ni es concebible, que la «información» sea jamás transferida en el sentido inverso, es decir de proteína a ADN. Esta noción se apoya en un conjunto de observaciones tan completas y tan seguras hoy en día, y sus consecuencias en la teoría de la evolución, principalmente, son tan importantes, que se la debe considerar como uno de los principios fundamentales de la moderna biología. De ello se deduce, en efecto, que no hay mecanismo *posible* por el que la estructura y las *performances* pudieran ser modificadas y estas modificaciones transmitidas, aunque sólo fuera parcialmente, a la descendencia, si no es como consecuencia de una alteración de las instrucciones representadas por un segmento de secuencia del ADN. Mientras que inversamente no existe ningún mecanismo concebible por el que una instrucción o información cualquiera pudiera ser transferido al ADN.

El sistema entero, por consecuencia, es totalmente, intensamente conservador, cerrado sobre sí mismo, y absolutamente incapaz de recibir cualquier instrucción del mundo exterior. Como se ve, este sistema, por sus propiedades, por su funcionamiento de relojería microscópica que establece entre ADN y proteína, como también entre organismo y medio, relaciones de sentido único, desafía toda descripción «dialéctica». Es pro-

fundamente cartesiano y no hegeliano: la célula es una máquina.

Podría, pues, parecer que, por su misma estructura, este sistema deba oponerse a todo cambio, a toda evolución. Nadie duda que no sea exactamente así, y aquí tenemos la explicación[7] de un hecho en verdad más paradójico que la misma evolución, a saber, la prodigiosa estabilidad de ciertas especies, que han sabido reproducirse sin modificaciones apreciables desde hace centenas de millones de años.

* * *

La física sin embargo no enseña que (salvo en el cero absoluto, límite inaccesible) toda entidad microscópica puede sufrir perturbaciones de orden cuántico, cuya acumulación, en el seno de un sistema macroscópico, alterará la estructura, de forma gradual pero infalible.

Los seres vivos, pese a la perfección conservadora de la maquinaria que asegura la fidelidad de la traducción, no escapan a esta ley. El envejecimiento y la muerte de los organismos pluricelulares se explican, al menos en parte, por la acumulación de errores accidentales de traducción que, alterando principalmente ciertos componentes responsables de la fidelidad de la traducción, acrecentan la frecuencia de estos errores, que degradan poco a poco, inexorablemente, la estructura de estos organismos.[8]

*Perturbaciones microscópicas*

El mecanismo de la replicación no podría tampoco, sin violar las leyes de la física, escapar a toda perturbación, a todo accidente. Al menos, algunas de estas perturbaciones entrañarán modificaciones más o menos discretas de ciertos elementos de secuencia. Errores de transcripción que, en virtud de la fidelidad ciega del mecanismo, serán, junto a otras perturbaciones, automáticamente retranscritos. Serán fielmente traducidos en una alteración de la secuencia de los aminoácidos en el polipéptido correspondiente al segmento de ADN en el que se producirá la *mutación.* Mas hasta que este polipéptido parcialmente nuevo se

7. Explicación parcial, v. pág. 121.
8. Orgel, L. E., *Proceedings of the National Academy of Science*, 49, pág. 517 (1963).

repliegue sobre sí mismo no se revelará la «significación» funcional de la mutación.

Entre las modernas investigaciones en biología, algunas de las más hermosas por su metodología, como también más profundamente significativas, constituyen lo que se llama la genética molecular (Benzer, Yanofsky, Brenner y Crick). Estas investigaciones han permitido, en particular, analizar los diferentes tipos de alteraciones accidentales discretas que puede sufrir una secuencia de polinucleótidos en la doble fibra del ADN. Se han identificado así diversas mutaciones como debidas a:

1. la sustitución de un solo par de nucleótidos por otro;
2. la supresión o la adición de uno o varios pares de nucleótidos;
3. diversos tipos de «mástiques» que alteran el texto genético por inversión, repetición, transposición y fusión de segmentos de secuencia más o menos largos.[9]

Decimos que estas alteraciones son accidentales, que tienen lugar al azar. Y ya que constituyen *la única* fuente posible de modificaciones del texto genético, *único* depositario, a su vez, de las estructuras hereditarias del organismo, se deduce necesariamente que *sólo* el azar está en el origen de toda novedad, de toda creación en la biosfera. El puro azar, el único azar, libertad absoluta pero ciega, en la raíz misma del prodigioso edificio de la evolución: esta noción central de la biología moderna no es ya hoy en día una hipótesis, entre otras posibles o al menos concebibles. Es *la sola* concebible, como única compatible con los hechos de observación y experiencia. Y nada permite suponer (o esperar) que nuestras concepciones sobre este punto deberán o incluso podrán ser revisadas.

Esta noción es, también, de todas las de todas las ciencias, la más destructiva de todo antropocentrismo, la más inaceptable intuitivamente para los seres intensamente teleonómicos que somos nosotros. Es pues la noción, o más bien el espectro, que debe a toda costa exorcizar todas las ideologías vitalistas y animistas. También es muy importante precisar en qué sentido exacto puede y debe ser empleada la palabra azar, tratándose de las mutaciones como fuente de la evolución. El contenido de la noción de azar no es simple, y la misma palabra se emplea en situaciones muy diferentes. Lo mejor es tomar algunos ejemplos.

9. Cf. Apéndice, págs. 176 y 177.

*Incertidumbre operacional e incertidumbre esencial*

Se emplea esta palabra, por ejemplo, a propósito del juego de dados, o de la ruleta, y se utiliza el cálculo de probabilidades para prever el resultado de una jugada. Pero estos juegos puramente mecánicos, y *macroscópicos,* no son «de azar» más que en razón de la imposibilidad *práctica* de gobernar con una precisión suficiente el lanzamiento del dado o el de la bola. Es evidente que un mecanismo de lanzamiento de muy alta precisión es concebible, y permitiría eliminar en gran parte la incertidumbre del resultado. Digamos que, en la ruleta, la incertidumbre es puramente operacional, pero no esencial. Ocurre igual, como se verá fácilmente, en la teoría de numerosos fenómenos donde se emplea la noción de azar y el cálculo de probabilidades por razones puramente metodológicas.

Pero, en otras situaciones, la noción de azar toma una significación esencial y no ya simplemente operacional. Es el caso, por ejemplo, de lo que se pueden llamar las «coincidencias absolutas», es decir, las que resultan de la intersección de dos cadenas causales totalmente independientes una de otra. Supongamos, por ejemplo, que el Dr. Dupont sea llamado urgentemente para visitar a un nuevo enfermo, mientras que el plomero Dubois trabaja en la reparación urgente de la techumbre de un inmueble vecino. Cuando el Dr. Dupont pasa por debajo del alero del inmueble, el plomero suelta por inadvertencia su martillo, cuya trayectoria (determinista) es interceptada por la del médico, que muere con el cráneo roto. Decimos que no hubo suerte. ¿Qué otro término emplear para un acontecimiento así, imprevisible por su misma naturaleza? El azar aquí debe evidentemente ser considerado como esencial, inherente a la independencia total de las dos series de acontecimientos cuyo encuentro produjo el accidente.

De modo que entre los acontecimientos que pueden provocar o permitir un error en la *replicación* del mensaje genético y sus consecuencias funcionales, hay igualmente independencia total. El efecto funcional depende de la estructura, del papel actual de la proteína modificada, de las interacciones que asegura, de las reacciones que cataliza. Cosas todas que no tienen nada que ver con el acontecimiento mutacional, como con sus causas inmediatas o lejanas, y, además, con la naturaleza determinista o no de estas «causas».

Existe, en fin, a escala microscópica, una fuente de incertidumbre más radical aún, enraizada en la estructura cuántica de la misma materia. Luego una mutación es en sí un acontecimiento microscópico, cuántico, al que por consecuencia se aplica el principio de incertidumbre. Acontecimiento pues *esencialmente* imprevisible por su misma naturaleza.

Como se sabe, el principio de incertidumbre no ha sido jamás enteramente aceptado por algunos de los más grandes físicos modernos, empezando por Einstein que decía no poder admitir que «Dios juegue a los dados». Ciertas escuelas han querido no ver más que una noción puramente operacional, pero no esencial. Todos los esfuerzos hechos para sustituir por una estructura más «fina» la teoría cuántica, con lo que la incertidumbre habría desaparecido, son sin embargo liquidados y muy pocos físicos parecen dispuestos a creer hoy en día que este principio podrá desaparecer de su disciplina.

Pase lo que pase es preciso subrayar que, aunque el principio de incertidumbre deba un día ser abandonado, todo permanecerá de modo que entre el determinismo, aunque sea total, de una mutación de secuencia en el ADN y sus efectos funcionales a nivel de las interacciones de la proteína, no se podrá ver más que una «coincidencia absoluta», en el sentido definido más arriba por la parábola del plomero y del doctor. El acontecimiento se quedará pues en el dominio del azar «esencial». A menos, claro, de volver al universo de Laplace, donde el azar está excluido por definición y donde el doctor, siempre, debía morir bajo el martillo del plomero.

### *La evolución: creación absoluta y no revelación*

Bergson, acordémonos, veía en la evolución la expresión de una fuerza creadora, *absoluta* en el sentido que no la suponía orientada a otro fin que la creación misma y por sí misma. En esto difiere radicalmente de los animistas (trátese de Engels, de Teilhard o de los positivistas optimistas como Spencer), que ven en la evolución el majestuoso desarrollo de un programa inscrito en la misma trama del Universo. Para ellos, en consecuencia, la evolución no es verdaderamente creación, sino únicamente «revelación» de las intenciones, hasta entonces inexpresadas, de la naturaleza. De aquí la tendencia a ver en el desarrollo embriona-

rio una emergencia del mismo orden que la emergencia evolutiva. Según la teoría moderna, la noción de «revelación» se aplica al desarrollo epigenético, pero no, desde luego, a la emergencia evolutiva que, gracias precisamente al hecho de que su fuente está en lo imprevisible esencial, es creadora de novedad *absoluta*. Esta convergencia aparente entre las vías de la metafísica bergsoniana y las de la ciencia, ¿será también el efecto de una pura coincidencia? Quizá no: Bergson, como artista y poeta que era, muy bien informado además de las ciencias naturales de su tiempo, no podía dejar de ser sensible a la deslumbrante riqueza de la biosfera, a la variedad prodigiosa de las formas y de los comportamientos que en ella se despliegan, y que parecen testimoniar casi directamente, en efecto, una prodigalidad creadora inagotable, libre de toda sujeción.

Pero allá donde Bergson veía la prueba más manifiesta de que el «principio de la vida» es la misma evolución, la biología moderna reconoce, al contrario, que todas las propiedades de los seres vivos reposan sobre un mecanismo fundamental de *conservación molecular.* Para la teoría moderna, *la evolución no es de ningún modo una propiedad de los seres vivos,* ya que tiene su raíz en las *imperfecciones mismas* del mecanismo conservador que constituye su único privilegio. Es preciso, pues, decir que la misma fuente de perturbaciones, de «ruido» que, en un sistema no vivo, es decir no replicativo, aboliría poco a poco toda estructura, es el origen de la evolución en la biosfera, y demuestra su total libertad creadora, gracias a este conservatorio del azar, sordo al ruido tanto como a la música: la estructura replicativa del ADN.

# 7

# Evolución

Los acontecimientos elementales iniciales que abren la vía de la evolución a esos sistemas intensamente conservadores que son los seres vivos, son microscópicos, fortuitos y sin ninguna relación con los efectos que puedan entrañar en el funcionamiento teleonómico.

### *El azar y la necesidad*

Pero, una vez inscrito en la estructura del ADN, el accidente singular, y como tal esencialmente imprevisible, va a ser mecánica y fielmente replicado y traducido, es decir a la vez multiplicado y transpuesto a millones o a miles de millones de ejemplares. Sacado del reino del puro azar, entra en el de la necesidad, de las certidumbres más implacables. Porque es a escala macroscópica, la del organismo, a la que opera la selección.

Muchos espíritus distinguidos, aún hoy, parecen no poder aceptar, ni incluso comprender, que de una fuente de ruido la selección haya podido, ella sola, sacar todas las músicas de la biosfera. La selección opera, en efecto, *sobre* los productos del azar y no puede alimentarse de otra forma; pero opera en un dominio de exigencias rigurosas donde el azar es desterrado. Es de estas exigencias, y no del azar, de donde la evolución ha sacado sus orientaciones generalmente ascendentes, sus conquistas sucesivas, el crecimiento ordenado del que ella parece dar la imagen.

Algunos evolucionistas postdarwinianos han tenido, además,

la tendencia de propagar una idea empobrecida de la selección natural, una idea ingenuamente feroz: la de la pura y simple «lucha por la vida», expresión, además, que no es de Darwin, sino de Spencer. Los neo-darwinianos de principio de siglo han propuesto, al contrario, una concepción mucho más rica y han mostrado, sobre la base de teorías cuantitativas, que el factor decisivo de la selección no es la «lucha por la vida» sino, en el seno de una especie, la tasa diferencial de reproducción.

Los datos de la biología contemporánea permiten aclarar y precisar aún más la noción de selección. Tenemos, particularmente, de la potencia, de la complejidad y de la coherencia de la red cibernética intracelular (incluso en los organismos más simples) una idea bastante clara, antes ignorada, que nos permite, mucho mejor que antiguamente, comprender que toda «novedad», bajo la forma de una alteración de la estructura de una proteína, podrá o no ser aceptada en función de su compatibilidad con el conjunto de un sistema ya ligado por innumerables sujeciones que deciden la ejecución del proyecto del organismo. Las únicas mutaciones aceptables son, pues, las que, por lo menos, no reducen la coherencia del aparato teleonómico, sino más bien lo confirman en la orientación ya adoptada o, sin duda más raramente, lo enriquecen de nuevas posibilidades.

El aparato teleonómico, tal como funciona cuando se expresa por primera vez una mutación, es el que define las *condiciones iniciales* esenciales de la admisión, temporal o definitiva, o del rechazo de la tentativa nacida del azar. Es la *performance* teleonómica, expresión global de las propiedades de la red de las interacciones constructivas y reguladoras, la que es juzgada por la selección, y es de este hecho que la evolución parece cumplir un «proyecto»: el de prolongar y amplificar un «sueño» ancestral.

### *Riqueza de la fuente de azar*

Gracias a la perfección conservadora del aparato replicativo, toda mutación, considerada individualmente, es un acontecimiento muy raro. En las bacterias, únicos organismos de los que se tienen numerosos y precisos datos en esta materia, se puede admitir que la probabilidad, para un gen dado, de sufrir una mutación que altere sensiblemente las propiedades funcionales de la proteína correspondiente, es del orden de $10^{-6}$ a $10^{-8}$ por generación celular. Pero en algunos mililitros de agua una población

de varios miles de millones de células puede desarrollarse. En una población así, se tiene, pues, la certeza de que toda mutación dada está representada por 10, 100 o 1.000 ejemplares. Se puede estimar igualmente que el número total de mutantes de todas las especies de esta población es del orden de $10^5$ a $10^6$.

A escala de la población, en consecuencia, la mutación no es en ningún modo un fenómeno excepcional; es la regla. O sea que es en el seno de la población, pero no en los individuos aislados, donde se ejerce la presión de selección. Las poblaciones de organismos superiores, es cierto, no alcanzan las dimensiones que las de las bacterias, pero:

1. el genoma de un organismo superior, por ejemplo un mamífero, contiene mil veces más genes que el de una bacteria;
2. el número de generaciones *celulares,* o sea de probabilidades de mutaciones, en la línea germinal de óvulo a óvulo o de espermatozoide a espermatozoide es muy grande.

Es quizá lo que explica que la tasa de algunas mutaciones en el hombre parezca relativamente elevada: del orden de $10^{-4}$ a $10^{-5}$ por ejemplo, para un cierto número de mutaciones, que provocan enfermedades genéticas fácilmente señalables. También es preciso hacer notar que las cifras aquí dadas no tienen en cuenta las mutaciones individualmente no descubribles, pero que, asociadas por recombinación sexual, podrían tener sensibles efectos. Es probable que tales mutaciones hayan tenido más importancia en la evolución que aquellas cuyos efectos individuales son más marcados.

En total, se puede estimar que, en la población humana actual ($3 \times 10^9$) se producen, en cada generación, de unos cien a mil millares de millones de mutaciones. No doy esta cifra más que para dar una idea de las dimensiones del inmenso depósito de variabilidad fortuita que constituye el genoma de una especie, pese, una vez más, a las propiedades celosamente conservadoras del mecanismo replicativo.

### «*Paradoja*» *de la estabilidad de las especies*

Teniendo en cuenta las dimensiones de esta enorme lotería y la velocidad a la que actúa la naturaleza, no es ya la evolución, sino al contrario la estabilidad de las «formas» en la biosfera lo que podría parecer difícilmente explicable, si no casi paradójico.

Se sabe que los planes de organización que corresponden a las principales ramificaciones del reino animal estaban diferenciados desde el fin del Cámbrico, o sea hace 500 millones de años. Se sabe también que incluso ciertas especies no han evolucionado sensiblemente desde centenas de millones de años. La língula, por ejemplo, desde hace 450 millones de años; en cuanto a la ostra de hace 150 millones de años, debía tener la misma apariencia y el mismo sabor que las que se sirven en los restaurantes.[1] En fin, se puede estimar que la célula «moderna», caracterizada por su plan de organización química invariante (empezando por la estructura del código genético y el mecanismo complicado de la traducción), existe desde hace dos o tres miles de millones de años, ya provista sin ninguna duda de potentes redes cibernéticas moleculares asegurando su coherencia funcional.

La extraordinaria estabilidad de algunas especies, los miles de millones de años que cubre la evolución, la invariancia del «plan» químico fundamental de la célula no pueden evidentemente explicarse más que por la extrema coherencia del sistema teleonómico que, en la evolución, ha jugado pues el papel a la vez de guía y de freno, y no ha retenido, amplificado, integrado más que una ínfima fracción de las probabilidades que le ofrecía, en número astronómico, la ruleta de la naturaleza.

El sistema replicativo, por su parte, lejos de poder eliminar las perturbaciones microscópicas de las que es inevitablemente el objeto, no sabe al contrario más que registrarlas y ofrecerlas, casi siempre vanamente, al filtro teleonómico cuyas *performances* son juzgadas, en último caso, por la selección.

* * *

Una mutación simple, puntual, como la sustitución de una letra del código por otra, en el ADN, es reversible. La teoría lo prevé, y la experiencia lo prueba. Pero toda evolución sensible, como la diferenciación de dos especies, incluso muy vecinas, resulta de un gran número de mutaciones independientes, sucesivamente acumuladas en la especie original, y después, siempre al azar, recombinadas gracias al «flujo genético» promovido por la sexualidad. Un fenómeno así, en razón del número de los acontecimientos independientes del que resulta, es estáticamente irreversible.

1. Simpson, *The Meaning of Evolution.* Yale University Press (1967).

## *La irreversibilidad de la evolución y el segundo principio*

La evolución en la biosfera es pues un proceso necesariamente irreversible, *que define una dirección en el tiempo;* dirección que es *la misma* que la que impone la ley de crecimiento de la entropía, es decir, el segundo principio de la termodinámica. Se trata de mucho más que de una comparación. El segundo principio está fundado sobre consideraciones estadísticas *idénticas* a las que establecen la irreversibilidad de la evolución. De hecho, *es legítimo considerar la irreversibilidad de la evolución como una expresión del segundo principio en la biosfera.* El segundo principio, no formulando más que una predicción estadística, no excluye, desde luego, que un sistema macroscópico cualquiera no pueda, en un movimiento de muy débil amplitud y con una duración muy corta, remontar la cuesta de la entropía, es decir, en cierto modo remontar el tiempo. En los seres vivos, son precisamente estos únicos y fugitivos movimientos los que, captados y reproducidos por el mecanismo replicativo, han sido retenidos por la selección. En este sentido la evolución selectiva, fundada sobre la elección de los raros y preciosos incidentes que también contiene, entre infinidad de otros, el inmenso depósito del azar microscópico, constituye una especie de máquina de remontar el tiempo.

No es sorprendente, sino al contrario muy natural, que los resultados obtenidos por este mecanismo de remontar el tiempo: la tendencia general ascendente de la evolución, el perfeccionamiento y el enriquecimiento del aparato teleonómico, hayan parecido milagrosos a unos, paradójicos a otros y que la teoría moderna «darwiniano-molecular» de la evolución sea hoy todavía considerada con suspicacia por algunos pensadores, filósofos o incluso biólogos.

## *Origen de los anticuerpos*

Esto resulta, al menos por una parte, de la extrema dificultad que existe en concebir la inagotable riqueza de la fuente de azar donde bebe la selección. Hay, sin embargo, un ejemplo destacable en el sistema de defensa del organismo por los anticuerpos.

Los anticuerpos son proteínas dotadas de la propiedad de reconocer por asociación estereoespecífica substancias extrañas al organismo y que lo han invadido, bacterias o virus, por ejemplo. Pero, como sabemos, el anticuerpo que reconoce electivamente una substancia dada, por ejemplo un «motivo estérico» particular a una cierta especie bacteriana, no aparece en el organismo (para habitarlo durante un cierto tiempo) más que después que éste haya hecho, al menos una vez, la «experiencia» (por la vacunación, espontánea o artificial). Se ha demostrado, además, que el organismo es capaz de formar anticuerpos adaptados prácticamente a no importa qué motivo estérico, natural o sintético. Las potencialidades, en este aspecto, parecen prácticamente infinitas.

Se ha supuesto, pues, durante largo tiempo, que la fuente de información para la síntesis de la estructura asociativa específica del anticuerpo era el mismo antígeno. Pero está establecido hoy que la estructura del anticuerpo no debe nada al antígeno: en el seno del organismo células especializadas, producidas en gran número, poseen la propiedad —única— de «jugar a la ruleta» en una parte, bien definida, de los segmentos genéticos que determinan la estructura de los anticuerpos. El funcionamiento exacto de esta ruleta genética especializada y ultrarrápida no está aún enteramene elucidado: es verosímil, sin embargo, que intervengan tanto recombinaciones como mutaciones, unas y otras en todo caso produciéndose al azar, en la ignorancia total de la estructura del antígeno. Éste, por el contrario, juega el papel de selector, favoreciendo diferencialmente la multiplicación de las células capaces de producir un anticuerpo que pueda reconocerle.

Es muy notable encontrar, en la base de uno de los fenómenos de adaptación molecular más exquisitamente precisos que se conoce, una fuente al azar. Pero está claro *(a posteriori)* que sólo una fuente así puede ser lo bastante rica para ofrecer al organismo medios de defensa en cierto modo «acimutales».

### *El comportamiento como orientando las presiones de selección*

Otra dificultad para la teoría selectiva proviene de haber sido demasiado a menudo comprendida o presentada como dependiente de las solas condiciones del *medio exterior* como agentes de la selección. Ésta es una concepción completamente errónea.

Porque las presiones de selección que ejercen sobre los organismos las condiciones externas, no son en nigún caso independientes de las *performances* teleonómicas características de la especie. Organismos diferentes viviendo en el mismo «nicho» ecológico, tienen con las condiciones externas (comprendidos los demás organismos), interacciones muy diferentes y específicas. Son estas interacciones específicas, en parte «escogidas» por el mismo organismo, las que determinan la naturaleza y la orientación de la presión de selección que él sufre. Digamos que las «condiciones iniciales» de selección que encuentra una mutación nueva, comprenden a la vez, y de forma indisoluble, el medio exterior y el conjunto de las estructuras y *performances* del aparato teleonómico.

Es evidente que el papel de las *performances* teleonómicas en la orientación de la selección es cada vez mayor a medida que se eleva el nivel de organización, es decir de *autonomía* del organismo respecto al medio. Y esto, al extremo que se pueda considerar sin duda este papel como decisivo en los organismos superiores, cuya supervivencia y reproducción dependen ante todo de su comportamiento.

Es, además, evidente que la elección inicial de uno y otro tipo de comportamiento podrá a menudo tener una influencia de gran duración, no sólo para la especie donde será manifestada por primera vez, sino para toda su descendencia, aunque constituya un grupo entero. Como se sabe, las grandes articulaciones de la evolución han sido debidas a la invasión de nuevos espacios ecológicos. Si los vertebrados tetrápodos han aparecido y han podido dar la maravillosa expansión que representan los anfibios, los reptiles, las aves y los mamíferos, es porque en el origen, un pez primitivo «eligió» el ir a explorar la tierra donde no podía sin embargo desplazarse más que saltando dificultosamente. Él creó así, como consecuencia de una modificación de comportamiento, la presión de selección que debía desarrollar los poderosos miembros de los tretrápodos. Entre los descendientes de este explorador audaz, este Magallanes de la evolución, algunos pueden correr a más de 70 km/h, otros trepan a los árboles con una sorprendente agilidad, otros en fin han conquistado el aire, cumpliendo, prolongando, amplificando de modo prodigioso el «sueño» del pez ancestral.

El hecho de que, en la evolución de algunos grupos, se observe una tendencia general, sostenida durante millones de años, al desarrollo aparentemente orientado de ciertos órganos, atesti-

gua que la elección inicial de un cierto tipo de comportamiento (ante la agresión de un predador por ejemplo) compromete a la especie a permanecer en la vía de un perfeccionamiento continuo de las estructuras y *performances* que son el soporte de este comportamiento. Debido a que los antecesores del caballo habían escogido vivir en la llanura y huir al acercarse un predador (antes que intentar defenderse o esconderse), la especie moderna, tras una larga evolución que comprende múltiples estados de reducción, anda hoy sobre el extremo de un solo dedo.

Se sabe que ciertos comportamientos muy precisos y complejos, como las ceremonias prenupciales de las aves, están estrechamente emparejados a ciertas características morfológicas particularmente llamativas. Es cierto que la evolución de este comportamiento y la del carácter anatómico sobre la que reposa van a la par, una atrayendo y reforzando a la otra bajo la presión de la selección sexual. Desde que ella comienza a desarrollarse en una especie, todo adorno asociado al éxito del acoplamiento no hace más que reforzar, confirmar en suma, la presión de selección inicial, y en consecuencia favorecer todo perfeccionamiento de este mismo adorno. Es pues legítimo decir que es el instinto sexual, en suma, el *deseo*, el que ha creado las condiciones de selección de algunos magníficos plumajes.[2]

Lamarck pensaba que la tensión de los esfuerzos desplegados por un animal para «triunfar en la vida» actuaba en algún modo sobre su patrimonio hereditario para incorporarse y modelar directamente su descendencia. El inmenso cuello de la jirafa expresaba en suma la voluntad constante que habían tenido sus antepasados de llegar a las ramas más altas de los árboles. Hipótesis hoy en día inaceptable, desde luego, pero que muestra que la pura selección, operando sobre los elementos del comportamiento, desemboca en el resultado que Lamarck quería expresar: el estrecho emparejamiento de las adaptaciones anatómicas y de las *performances* específicas.

## *El lenguaje y la evolución del hombre*

Es en estos términos en los que es preciso considerar el problema de las presiones de selección que han orientado la evolu-

2. Cf. N. Tinbergen, *Social Behavior in Animals,* Methuen, Londres (1953).

ción del hombre. Problema de un interés excepcional, independientemente incluso del hecho de que se trate de nosotros, y que al discernir mejor en su evolución las raíces de nuestro ser, pudiera llegarse a comprenderlo mejor en su actual naturaleza. Porque un observador imparcial, un marciano por ejemplo, debería sin ninguna duda reconocer que el desarrollo de la *performance* específica del hombre, el lenguaje simbólico, acontecimiento único en la biosfera, abre el camino a *otra* evolución, creadora de un nuevo reino, el de la cultura, de las ideas, del conocimiento.

Acontecimiento único: los lingüistas modernos han insistido en el hecho de que el lenguaje simbólico del hombre es absolutamente irreductible a los medios de comunicación tan diversos (auditivos, táctiles, visuales u otros) empleados por los animales. Actitud sin ninguna duda justificada. Pero de aquí a afirmar que la discontinuidad en la evolución ha sido absoluta, que el lenguaje humano *desde el origen* no debía estrictamente nada, por ejemplo, a un sistema de llamadas y avisos variados como los que intercambian los grandes simios, me parece un paso difícil de franquear, en todo caso una hipótesis inútil.

El cerebro de los animales es, sin duda alguna, capaz, no sólo de registrar informaciones, sino también de asociarlas y transformarlas, y de restituir el resultado de estas operaciones bajo forma de una *performance* individual; pero no, y éste no es el punto esencial, bajo una forma que permita comunicar a otro individuo una asociación o transformación original, personal. Esto es, contrariamente a lo que permite el lenguaje humano, lo que hace que se le pueda considerar por definición como nacido el día en que combinaciones creadoras, asociaciones *nuevas,* realizadas en un individuo, pudieron, transmitidas a otros, no perecer con él.

No se conocen lenguas primitivas: en todas las razas de nuestra única especie moderna, el instrumento simbólico ha llegado sensiblemente al mismo nivel de complejidad y poder de comunicación. Según Chomsky, además, la estructura profunda, la «forma» de todas las lenguas humanas es la misma. Las extraordinarias *performances* que la lengua a la vez representa y autoriza, están evidentemente asociadas al desarrollo considerable del sistema nervioso central en el *Homo sapiens;* desarrollo que constituye además su rasgo anatómico más distintivo.

Se puede hoy afirmar que la evolución del hombre, desde sus más antiguos antecesores conocidos, se ha centrado ante todo en el desarrollo progresivo de la caja craneana, o sea del cerebro.

Ha sido necesario para ello una presión de selección orientada, continuada, y sostenida desde más de dos millones de años. Presión de selección considerable, porque esta duración es relativamente corta, y *específica* porque no se ve nada parecido en ninguna otra raza: la capacidad craneana de los simios antropomorfos modernos no es más grande casi que la de sus antecesores de hace algunos millones de años.

Es imposible no suponer que entre la evolución privilegiada del sistema nervioso central del hombre y la de la *performance* única que lo caracteriza, no hubiese habido un emparejamiento muy estrecho, que hizo del lenguaje no sólo el producto, sino una de las condiciones iniciales de esta evolución.

La hipótesis que me parece más verosímil es que, aparecida muy prontamente en nuestra raza, la comunicación simbólica más rudimentaria, por las posibilidades radicalmente nuevas que ofrecía, constituyó una de estas «elecciones» iniciales que comprometen el porvenir de la especie creando una presión de selección nueva; esta selección debía favorecer el desarrollo de la *performance* lingüística y por consecuencia la del órgano que la sirve, el cerebro. Hay, creo, a favor de esta hipótesis, argumentos bastante poderosos.

Los hominianos auténticos más antiguos que se conocen hoy (los Australopitecos, que Leroi-Gourhan, con razón prefiere llamar Australántropos) poseían ya, lo que los definía además, las características que distinguen al hombre de sus más próximos parientes, los póngidos (es decir los simios antropoides). Los Australántropos habían adoptado la posición erecta, asociada no sólo a una especialización del pie, sino a numerosas modificaciones del esqueleto y de la musculatura, principalmente de la columna vertebral y de la posición del cráneo en relación a aquélla. Se ha insistido a menudo sobre la importancia que ha debido tener, en la evolución del hombre, la liberalización de las servidumbres de la marcha a cuatro patas practicada por todos los antropoides, a excepción sin embargo del gibón. Nadie duda que esta invención, muy antigua (anterior a los Australántropos), haya tenido una extrema importancia: sólo ella podía permitir a nuestros antepasados convertirse en cazadores capaces, sin dejar de andar o de correr, de utilizar sus miembros anteriores.

La capacidad craneana de estos hominianos primitivos era sin embargo apenas superior a la de un chimpancé y ligeramente inferior a la de un gorila. El peso del cerebro no es seguramente proporcional a sus *performances*. Nadie duda, sin embargo, que

le impone un límite, y que el *Homo sapiens* no hubiese podido emerger sino gracias al desarrollo de su caja craneana.

Sea lo que sea, parece establecido que si el cerebro del Zijántropo no pesaba más que el del gorila, era, sin embargo capaz de *performances* desconocidas para los póngidos: El Zijántropo, en efecto, tenía una industria, tan primitiva a decir verdad que sus «útiles» no son reconocibles como artefactos más que por la repetición de las mismas estructuras, muy rudimentarias, y por su agrupamiento alrededor de ciertos esqueletos fósiles. Los grandes simios emplean «útiles» naturales, piedras o ramas de árboles, cuando se presenta la ocasión, pero no producen nada comparable a artefactos confeccionados según una *norma* reconocible.

Así el Zijántropo debe ser considerado como un *Homo faber* muy primitivo. Luego, parece muy verosímil, que entre el desarrollo del lenguaje y el de una industria testimoniando una actividad proyectiva y disciplinada, deba haber una correlación muy estrecha.[3] Parece pues razonable suponer que los Australántropos poseían un instrumento de comunicación simbólica a la medida de su industria rudimentaria. Además, si es cierto como piensa Dart,[4] que los Australántropos cazaban con éxito, como otros animales, bestias poderosas y peligrosas como el rinoceronte, el hipopótamo y la pantera, sería preciso que esto fuera una *performance* convenida de antemano por un grupo de cazadores. Proyecto cuya formulación previa habría exigido el empleo de un lenguaje.

A esta hipótesis parecía oponerse el débil desarrollo en volumen del cerebro de los Australántropos. Pero recientes experiencias con un joven chimpancé parecen mostrar que, si los simios son incapaces de aprender el lenguaje articulado, pueden asimilar y utilizar algunos elementos del lenguaje simbólico de los sordomudos.[5] Podemos entonces suponer que la adquisición del poder de simbolización articulada ha podido depender de modificaciones neuromotrices, no necesariamente muy complejas, en un animal que era, en este estado, más inteligente que un chimpancé actual.

Pero es evidente que una vez franqueado este paso, el uso de

3. Leroi-Gourhan, *Le geste et la parole*, Albin-Michel (1964). R. L. Holloway, «Current Anthropology», 10, 395 (1969) - J. Bronowsky, en *To Honor Roman Jakobson*, Mouton, París, página 347 (1967).
4. Según Leroi-Gourhan, *loc. cit.*
5. B.T. Gardner y R. A. Gardner, en *Behavior of nonhuman Primates*, Schrier y Stolnitz, Edit., Academic Press, Nueva York (1970).

un lenguaje, por primitivo que sea, no puede dejar de acrecentar en proporciones considerables el valor de supervivencia de la inteligencia, y de crear en favor del desarrollo del cerebro una precisión de selección poderosa y orientada, tal como ninguna especie afásica podía jamás esperar. En el momento que existe un sistema de comunicación simbólica, los individuos, o más bien los grupos mejor dotados para su empleo, adquieren sobre los otros una ventaja incomparablemente más grande que la que les habría conferido una igual superioridad de inteligencia a individuos de una especie desprovista de lenguaje. Vemos también que la presión de selección debida al uso de un lenguaje debe favorecer especialmente la evolución del sistema nervioso central en el sentido de una inteligencia de un cierto tipo: el que es más apto para explotar esta *performance* particular, específica, dueña de inmensos poderes.

### *La adquisición primaria del lenguaje*

Esta hipótesis sólo sería atrayente y razonable si no hubiese además adquirido singular importancia al haber sido reclamada por algunos datos relativos al actual lenguaje. El estudio de la adquisición del lenguaje por el niño sugiere de modo irresistible[6] que si este proceso nos parece milagroso se debe a que es, por naturaleza, profundamente diferente del aprendizaje regular de un sistema de reglas formales. El niño no aprende regla alguna, ni siquiera intenta imitar el lenguaje de los adultos. Podría decirse que en cada estadio de su desarrollo toma del lenguaje aquello que le conviene. En el estadio primerísimo (hacia el decimoctavo mes), el niño puede poseer un stock de diez palabras, que siempre usa aisladamente, sin asociarlas jamás, ni por imitación. Más tarde asociará las palabras de dos en dos, o de tres en tres, etc., de acuerdo con una síntesis que tampoco es simple repetición o imitación del lenguaje adulto. Este proceso parece que es universal y que su cronología es idéntica para todas las lenguas. La facilidad con que, en dos o tres años (después del primero), este juego del niño con la lengua le da sobre ella un perfecto dominio parece siempre increíble al observador adulto.

Por eso es difícil no ver el reflejo de un proceso embriológi-

6. E. Lenneberg, *Biological Foundations of Language*, Wiley, Nueva York (1976).

co, epigenético, en el curso del cual se desarrollan las estructuras neurales subyacentes a las *performances* lingüísticas. Esta hipótesis se ve confirmada por las observaciones relativas a las afasias de origen traumático. Cuando se dan en el niño, estas afasias retroceden tanto más rápidamente y más completamente cuanto más joven sea el pequeño. Estas lesiones son, al contrario, irreversibles cuando ocurren en la pubertad o más tarde. Todo un conjunto de observaciones, además de las aducidas, confirman que existe una edad crítica para la adquisición espontánea del lenguaje. Cada cual sabe perfectamente que aprender una segunda lengua en la edad adulta exige un esfuerzo voluntario sistemático y sostenido. El estatuto de la lengua aprendida en estas condiciones permanece siempre prácticamente inferior al de la lengua natal, aprendida espontáneamente.

### *La adquisición del lenguaje programado en el desarrollo epigenético del cerebro*

La idea de que la adquisición primaria del lenguaje está vinculada a un proceso de desarrollo epigenético se ve confirmada por los datos anatómicos. En efecto, se sabe que la maduración del cerebro prosigue después del nacimiento para acabar en la pubertad. Este desarrollo parece consistir esencialmente en un enriquecimiento considerable de las intercomunicaciones de las neuronas corticales. Este proceso, muy rápido durante los dos primeros años, se retrasa después. No continúa (visiblemente) más allá de la pubertad y cubre, por consiguiente, el «período crítico» durante el que la adquisición primaria es posible.[7]

De esto a pensar que si, en el niño, la adquisición del lenguaje parece tan milagrosamente espontánea es poque se inscribe en la misma trama de desarrollo epigenético, *una de cuyas funciones es acogerle,* entonces sólo hay un paso que, por mi parte, no dudo en dar. Para intentar ser un poco más preciso: de este crecimiento postnatal del córtex depende, sin duda alguna, el desarrollo de la función cognitiva. Es la adquisición del lenguaje en el curso mismo de esta epigénesis lo que permitiría asociarlo a la función cognitiva y esto de un modo tan íntimo que es muy difícil para nosotros disociar, por la introspección, la *performance* lingüística del conocimiento que explicita.

7. Lenneberg, *loc. cit.*

Se admite en general que el lenguaje no constituye más que una «superestructura», a lo que se llega, claro está, por la extrema diversidad de las lenguas humanas, productos de la segunda evolución, la de la cultura. Sin embargo, la amplitud y el refinamiento en el *Homo sapiens* de las funciones cognitivas no encuentran, evidentemente, su razón de ser más que y por el lenguaje. Privadas de este instrumento, son, en su mayor parte, inutilizables, paralizadas. En este sentido la capacidad lingüística ya no puede ser considerada como una superestructura. Es preciso admitir que entre las funciones cognitivas y el lenguaje simbólico, que ellas reclaman y por las que se explicitan, hay en el hombre moderno una estrecha simbiosis, que no puede ser producto más que de una larga evolución común.

Se sabe que, según Chomsky y su escuela, bajo la extrema diversidad de las lenguas humanas, el análisis lingüístico en profundidad revela una «forma» común a todas ellas. Esta forma debe pues, según Chomsky, ser considerada como *innata* y característica de la especie. Esta concepción ha escandalizado a algunos filósofos o antropólogos que ven en ella un retorno a la metafísica cartesiana. A condición de aceptar el contenido biológico implícito, esta condición no me choca en absoluto. Ella me parece, al contrario, natural, a partir del momento en que se admite que la evolución de las estructuras corticales del hombre no ha podido dejar de ser influenciada, en una parte importante, por una capacidad lingüística adquirida de modo muy temprano en el estadio más rudimentario. Lo que es lo mismo que admitir que el lenguaje articulado, desde su aparición en el linaje humano, no ha permitido solamente la evolución de la cultura, sino ha contribuido de modo decisivo a la evolución *física* del hombre. Si ha sucedido así, la capacidad lingüística que se revela en el curso del desarrollo epigenético del cerebro forma parte actualmente de la «naturaleza humana» definida en el seno del genoma en un lenguaje radicalmente diferente del código genético. ¿Milagro? Ciertamente, puesto que en última instancia se trata de un producto del azar. Pero el día en que el Zijántropo, o cualquiera de sus compañeros, usó por vez primera un símbolo articulado para representar una categoría, aumentó por este hecho en proporciones inmensas la probabilidad de que un día emergiera un cerebro capaz de concebir la Teoría darwiniana de la Evolución.

# 8

# Las fronteras

Cuando se piensa en el inmenso camino recorrido por la evolución a lo largo de tres mil millones de años, en la prodigiosa riqueza de las estructuras que ha creado, en la milagrosa eficacia de las *performances* de los seres vivos, de la bacteria al hombre, se puede empezar a dudar que todo ello sea producto de una enorme lotería, sacando números al azar, entre los cuales una selección ciega ha designado los escasos ganadores.

## *Las fronteras actuales del conocimiento biológico*

Al repasar en sus detalles las pruebas hoy acumuladas y ver que esta concepción es la única compatible con los hechos (principalmente con los mecanismos moleculares de la replicación, de la mutación y de la traducción), se halla la certidumbre, pero no sin embargo una comprensión inmediata, sintética e intuitiva, de la evolución en su conjunto. El milagro está «explicado»: nos parece aún milagroso. Como escribió Mauriac: «Lo que dice este profesor es mucho más increíble aún que lo que nosotros, pobres cristianos, creemos.»

Es cierto, como también lo es que no llegamos a formarnos una imagen mental satisfactoria de algunas abstracciones de la física moderna. Pero sabemos también que tales dificultades no pueden tomarse como argumento contra una teoría basada en las certidumbres de la experiencia y de la lógica. Para la física, microscópica o cosmológica, vemos la causa de la incomprensión intuitiva: la escala de los fenómenos considerados trasciende

las categorías de nuestra experiencia inmediata. Sólo la abstracción puede suplir esta incapacidad, sin curarla. Para la biología la dificultad es de otro orden. Las interacciones elementales sobre las que reposa toda la trama son relativamente fáciles de comprender gracias a su carácter mecanístico. Es la fenomenal complejidad de los sistemas vivientes lo que desafía toda representación intuitiva global. En biología como en física, no hay, en estas dificultades subjetivas, argumento contra la teoría.

Se puede decir hoy en día que los mecanismos elementales de la evolución están no sólo comprendidos en principio, sino identificados con precisión. La solución encontrada es tanto más satisfactoria cuanto que se trata de los mecanismos que aseguran la estabilidad de las especies: invariancia replicativa del ADN, coherencia teleonómica de los organismos.

La evolución sigue siendo en biología la noción central, destinada a enriquecerse y precisarse durante mucho tiempo aún. Sin embargo, en lo esencial, el problema está resuelto y la evolución no figura ya en las fronteras del conocimiento.

Por mi parte, veo estas fronteras situadas en los dos extremos de la evolución: el origen de los primeros sistemas vivientes por un lado, y por otro el funcionamiento del sistema más intensamente teleonómico que jamás haya surgido; me refiero al sistema nervioso central del hombre. En el presente capítulo, querría intentar delimitar estas dos fronteras de lo desconocido.

## *El problema de los orígenes*

Se podría pensar que el descubrimiento de los mecanismos universales sobre los que reposan las propiedades esenciales de los seres vivos ha facilitado la solución del problema de los orígenes. De hecho, estos descubrimientos, renovando casi enteramente la cuestión, planteada hoy en términos mucho más precisos, la han revelado más difícil todavía de lo que antes parecía.

Se pueden *a priori* definir tres etapas en el proceso que ha podido conducir a la aparición de los primeros organismos:

a) la formación en la tierra de los constituyentes químicos esenciales de los seres vivos, nucleóticos y aminoácidos;

b) la formación, a partir de estos materiales, de las primeras macromoléculas de replicación;

c) la evolución que, alrededor de estas «estructuras replica-

tivas», ha construido un aparato teleonómico, hasta llegar a la célula primitiva.

Los problemas que plantea la interpretación de cada una de estas etapas son diferentes.

La primera, llamada a menudo la fase «prebiótica», es ampliamente accesible, no sólo en la teoría, sino en la experiencia. Si la incertidumbre continúa, y continuará sin duda, en lo tocante a las vías que ha seguido de hecho la evolución química prebiótica, el cuadro de conjunto, por otra parte, parece bastante claro. Las condiciones de la atmósfera y de la corteza terrestre, hace cuatro mil millones de años, eran favorables a la acumulación de ciertos compuestos simples del carbono, tales como el metano. Había también agua y amoníaco. Y, de estos compuestos simples y en presencia de catalizadores no biológicos, se obtienen bastante fácilmente numerosos cuerpos más complejos, entre los que figuran aminoácidos y precursores de los nucleótidos (bases nitrogenadas, azúcares). El hecho notable es que, en ciertas condiciones, en que la reunión parece muy plausible, el rendimiento de estas síntesis en cuerpos idénticos o análogos a los constituyentes de la célula moderna, es muy elevado.

Se puede considerar pues como *probado* que, en un momento dado, sobre la Tierra, algunas extensiones de agua *podrían* contener en solución concentraciones elevadas de los constituyentes esenciales de las dos clases de macromoléculas biológicas, ácidos nucleicos y proteínas. En esta «sopa prebiótica» diversas macromoléculas podían formarse por polimerización de sus precursores, aminoácidos y nucleótidos. En efecto, se han obtenido en laboratorio, en condiciones «plausibles», polipéptidos y polinucleótidos parecidos por su estructura general a las macromoléculas «modernas».

Hasta aquí, en consecuencia, no hay grandes dificultades. Pero la primera etapa decisiva no está franqueada: la formación de macromoléculas capaces, en las condiciones de la sopa primitiva, de promover su propia replicación sin el auxilio de ningún aparato teleonómico. Esta dificultad no parece invencible. Se ha mostrado que una secuencia polinucleotídica puede efectivamente guiar, por emparejamiento espontáneo, la formación de elementos de secuencia complementaria. Está claro que un mecanismo así sería muy ineficaz y sujeto a innumerables errores. Pero, desde el momento en que entran en juego, los tres procesos fundamentales de la evolución: replicación, mutación, selección, comienzan a operar y dan una ventaja considerable a las macro-

moléculas más aptas, por su estructura secuencial, para replicarse espontáneamente.[1]

La tercera etapa es, por hipótesis, la emergencia gradual de los sistemas teleonómicos que, alrededor de la estructura replicativa, deben construir un *organismo,* una célula pimitiva. Es aquí cuando se llega verdaderamente a la «barrera del sonido», porque no tenemos la más mínima idea de cómo podía ser la estructura de una célula primitiva. El sistema viviente más simple que conocemos, la célula bacteriana, pequeña maquinaria de una complejidad y una eficacia extremas, alcanzó seguramente su presente estado de perfección hace unos mil millones de años. El plan de conjunto de la química de esta célula es el mismo que el de todos los demás seres vivientes. Ella emplea el mismo código genético y la misma mecánica de traducción que, por ejemplo, las células humanas.

Así, las células más simples que nos es posible estudiar, no tienen nada de «primitivo». Son el producto de una selección que ha podido, a través de quinientos o mil millares de millones de generaciones, acumular un aparejo teleonómico tan poderoso que los vestigios de las estructuras verdaderamente primitivas son indiscernibles. Reconstruir, sin fósiles, semejante evolución es imposible. De todos modos quería intentar sugerir una hipótesis plausible en cuanto a la vía seguida por esta evolución, sobre todo en su punto de arranque.

El desarrollo del sistema metabólico, que debió, a medida que se empobrecía el caldo primitivo, «aprender» a movilizar el potencial químico y a sintetizar los constituyentes celulares, plantea ingentes problemas. Igual sucede para la emergencia de la membrana de permeabilidad selectiva sin la que no puede haber célula viable. Pero el mayor problema es el origen del código genético y del mecanismo de su traducción. De hecho, no es de un «problema» de lo que debería hablarse, sino más bien de un verdadero enigma.

### *El enigma del origen del código*

El código no tiene sentido si no es traducido. La máquina traductora de la célula moderna comporta al menos cincuenta constituyentes macromoleculares *que son ellos mismos codifica-*

1. L. Orgel, *loc. cit.*

*dos en el ADN: el código no puede ser traducido más que por productos de traducción.* Es la expresión moderna de *omne vivum ex ovo.* ¿Cuándo y cómo se cerró este anillo? Es demasiado difícil de imaginar. Pero el hecho de que el código sea hoy descifrado y conocido por ser universal permite al menos plantear el problema en términos precisos; simplificando un poco bajo el aspecto de la siguiente alternativa:

a) la estructura del código se explica por razones químicas, o más exactamente estereoquímicas; si un cierto código ha sido «escogido» para representar un cierto aminoácido, es porque existe entre ellos una cierta afinidad estereoquímica;

b) la estructura del código es químicamente arbitraria; el código, tal como nosotros lo conocemos, resulta de una serie de elecciones al azar que poco a poco lo han enriquecido.

La primera hipótesis parece con mucho la más seductora. En primer lugar porque explicaría la universalidad del código. A continuación porque permitiría imaginar un mecanismo primitivo de traducción en el que el alineamiento secuencial de los aminoácidos para formar un polipéptido sería debido a una interacción directa entre los aminoácidos y la estructura replicativa. En fin, y principalmente, porque esta hipótesis, si fuera verdadera, sería en principio verificable. Pero de las numerosas tentativas de verificación que han sido hechas, el balance, por el momento, debe ser considerado como negativo.[2]

Quizá la última palabra sobre este asunto aún no haya sido pronunciada. Esperando una confirmación que parece improbable, pasamos a la segunda hipótesis, desagradable por razones metodológicas, lo que no significa en ningún modo que sea inexacta. Desagradable por varias razones. No explica la universalidad del código. Es preciso entonces admitir que, entre numerosas tentativas de elaboración, una sola ha sobrevivido. Lo que, en sí, es muy verosímil además, pero que no propone ningún modelo de traducción primitiva. La especulación debe entonces suplirlo. Y no faltan algunas muy ingeniosas: el campo está libre, demasiado libre.

El enigma sigue, y encubre también la respuesta a una pregunta de profundo interés. La vida ha aparecido sobre la tierra: ¿cuál era *antes del acontecimiento* la probabilidad de que apareciera? No queda excluida, al contrario, por la estructura actual

2. Cf. F. Crick «Journal of Molecular Biology», 38, págs. 367-279 (1968).

de la biosfera, la hipótesis de que el acontecimiento decisivo no se haya producido *más que una sola vez*. Lo que significaría que su probabilidad *a priori* es casi nula.

Esta idea repugna a la mayoría de los hombres de ciencia. De un acontecimieno único la ciencia no puede decir ni hacer nada. No puede «discurrir», formando una clase, más que sobre acontecimientos cuya probabilidad *a priori*, por débil que sea, es finita. Además, por la universalidad misma de sus estructuras, empezando por el código, la biosfera aparece como el producto de un acontecimiento único. Es posible, desde luego, que este carácter singular se deba a la eliminación, por la selección, de muchas otras tentativas o variantes. Mas nada impone esta interpretación.

La probabilidad *a priori* de que se produzca un acontecimiento particular entre todos los acontecimientos posibles en el universo, está próxima a cero. No obstante el universo existe; es preciso que se produzcan acontecimientos, cuya probabilidad (antes del acontecimiento) sea ínfima. No tenemos, en la hora actual, el derecho de afirmar, ni el de negar, que la vida haya aparecido *una sola vez* sobre la Tierra, y que, por consecuencia, antes de que existiera, sus posibilidades de ser fuesen casi nulas.

Esta idea no resulta desagradable sólo a los biólogos como hombres de ciencia. Ella choca con nuestra tendencia humana de creer que toda cosa real en el universo actual era necesaria, y desde siempre. Nos es preciso estar siempre en guardia contra el sentimiento tan poderoso del destino. La ciencia moderna ignora toda inmanencia. El destino se escribe a medida que se cumple, no antes. El nuestro no lo estaba antes de que emergiera la especie humana, única en la biosfera en la utilización de un sentido lógico de comunicación simbólica. Otro acontecimiento único que debería, por eso mismo, prevenirnos contra todo antropocentrismo. Si fue único, como quizá lo fue la aparición de la misma vida, sus posibilidades, antes de aparecer, eran casi nulas. El Universo no estaba preñado de la vida, ni la biosfera del hombre. Nuestro número salió en el juego de Montecarlo. ¿Qué hay de extraño en que, igual que quien acaba de ganar mil millones, sintamos la rareza de nuestra condición?

El lógico podría advertir al biólogo que sus esfuerzos para «comprender» el entero funcionamiento del cerebro humano están condenados al fracaso porque ningún sistema lógico sabe describir integralmente su propia estructura. Esta advertencia estaría fuera de lugar, tan lejos se está aún de esta frontera absoluta del conocimiento. De todas maneras esta objeción lógica no se aplica al análisis por el hombre del sistema nervioso central de un animal. Sistema que se puede suponer menos complejo y menos potente que el nuestro. Incluso en este caso, sin embargo, existe una dificultad importante: la experiencia consciente de un animal nos resulta impenetrable y sin duda siempre lo seguirá siendo. ¿Se puede afirmar que una descripción exhaustiva del funcionamiento del cerebro de una rana, por ejemplo, sería posible, en principio, mientras que aquel dato permaneciera inaccesible? Se puede poner en duda. De modo que la exploración del cerebro humano, pese a las barreras opuestas a la experimentación, permanecerá siempre irreemplazable, por la posibilidad que ofrece de comparar los datos objetivos y subjetivos relativos a una experiencia.

Pase lo que pase, la estructura y el funcionamiento del cerebro pueden y deben ser explotados simultáneamente en todos los niveles accesibles con la esperanza de que estas investigaciones, muy diferentes tanto por sus métodos como por su objeto inmediato, convergerán un día. Por el momento ellas casi no convergen más que por las dificultades que comportan.

Entre las más difíciles e importantes, están los problemas que plantea el desarrollo epigenético de una estructura tan compleja como el sistema nervioso central. En el hombre, comprende de $10^{12}$ a $10^{13}$ neuronas interconectadas por medio de unas $10^{14}$ a $10^{15}$ sinapsis, que asocian en algunos casos células nerviosas alejadas. He mencionado ya el enigma que plantea la realización de interacciones morfogenéticas a distancia y no insistiré aquí sobre ello. Al menos tales problemas pueden ser claramente planteados gracias, indudablemente, a ciertas notables experiencias.[3]

No se puede comprender el funcionamiento del sistema nervioso central a menos de conocer el del elemento lógico primario que constituye la sinapsis. De todos los niveles de análisis es el

3. Sperry, *passim.*

más accesible a la experiencia, y ciertas técnicas refinadas han aportado una considerable masa de documentos. Se está lejos aún, sin embargo, de una interpretación de la transmisión sináptica en términos de interacciones moleculares. Problema esencial sin embargo, ya que es aquí sin duda donde reside el último secreto de la memoria. Se ha propuesto desde hace largo tiempo que éste sea registrado en forma de una alteración más o menos irreversible de las interacciones moleculares responsables de la transmisión del influjo nervioso a nivel de un conjunto de sinapsis. Esta teoría tiene mucha verosimilitud, pero no pruebas directas.[4]

Pese a esta profunda ignorancia referente a los mecanismos primarios del sistema nervioso central, la electrofisiología moderna ha aportado resultados profundamente significantes sobre el análisis y la integración de las señales nerviosas, principalmente en ciertas vías sensoriales.

En primer lugar sobre las propiedades de la neurona como integradora de las señales que puede recibir (por intermedio de las sinapsis) de otras numerosas células. El análisis ha probado que la neurona es estrechamente comparable, por sus *performances,* a los componentes integrados de una calculadora electrónica. Es capaz como éstos de efectuar, por ejemplo, todas las operaciones lógicas del álgebra proposicional. Pero además puede adicionar o sustraer diferentes señales teniendo en cuenta su coincidencia en el tiempo, así como modificar *la frecuencia* de las señales que emite en función de *la amplitud* de las que recibe. De hecho, parece que ningún componente unitario, actualmente utilizado por las modernas calculadoras, sea capaz de *performances* tan variadas y finamente moduladas. Sin embargo la analogía entre las máquinas cibernéticas y el sistema nervioso central es impresionante, y la comparación fructuosa. Pero es preciso ver que se limita todavía a los niveles inferiores de integración: primeros grados del análisis sensorial por ejemplo. Las funciones superiores del córtex, en las que el lenguaje es la expresión, parecen aún escaparse totalmente. Nos podríamos preguntar si no habrá más que una diferencia «cuantitativa» (grado

4. Una teoría según la cual la memoria estaría codificada en la secuencia de los radicales de algunas macromoléculas (ácidos ribonucleicos) ha sido aceptada recientemente por algunos fisiólogos. Éstos creen así aparentemente juntar y utilizar las concepciones sacadas del estudio del código genético. Pero esta teoría es insostenible en relación, precisamente, con nuestros conocimientos actuales sobre el código y los mecanismos de la traducción.

de complejidad), o quizá se trate de una diferencia «cualitativa». Esta pregunta para mí no tiene sentido. Nada permite suponer que las interacciones elementales sean de diferente naturaleza a diferentes niveles de integración. Si hay un caso donde sea aplicable la primera ley de la dialéctica, con seguridad es en éste.

### *Funciones del sistema nervioso central*

El mismo refinamiento de las funciones cognitivas en el hombre, y la propagación de las aplicaciones que de ellas hace, enmascaran las funciones primordiales que llenan el cerebro de la serie animal (comprendido el hombre). Quizá se pueda enumerar y definir estas funciones primordiales de la manera siguiente:

1. asegurar el pedido y la coordinación central de la actividad neuromotriz en función, principalmente, de las correspondencias sensoriales;
2. contener, en forma de circuitos genéticamente determinados, programas de acción más o menos complejos; liberarlos en función de estímulos particulares;
3. analizar, filtrar e integrar las correspondencias sensoriales para construir una representación del mundo exterior adaptada a las *performances* específicas del animal;
4. registrar los acontecimientos que (teniendo en cuenta la gama de *performances* específicas) son significativos, agruparlos en clases, según sus analogías; asociar estas clases según las relaciones (de coincidencia o de sucesión) de los acontecimientos que las constituyen; enriquecer, refinar y diversificar los programas innatos incluyendo estas experiencias;
5. imaginar, es decir, *representar y simular* acontecimientos exteriores, o programas de acción del mismo animal.

Las funciones definidas por los tres primeros apartados son realizadas por el sistema nervioso central de animales que no se califica generalmente de superiores: artrópodos, por ejemplo. Los ejemplos más espectaculares que se conocen de programas de acción innatos muy complejos se encuentran en los insectos. Es dudoso que las funciones resumidas en el párrafo 4 desempeñen un papel importante en estos animales.[5] Por el contrario, contribuyen

5. A excepción, quizá de las abejas.

de manera muy importante al comportamiento de los invertebrados superiores, como el pulpo[6] y todos los vertebrados.

En cuanto a las funciones del párrafo 5, que se podrían llamar «proyectivas», son sin duda el privilegio de los vertebrados superiores. Pero, aquí, la barrera de la conciencia se interpone, y puede ser que no sepamos reconocer los signos exteriores de esta actividad (el sueño, por ejemplo) más que en nuestros próximos parientes, sin que otras especies estén sin embargo privadas.

Las funciones 4 y 5 son cognitivas, mientras que las de los párrafos 1, 2 y 3 son únicamente coordinadoras y representativas. Sólo las funciones 5 pueden ser creadoras de *experiencia subjetiva.*

## *El análisis de las impresiones sensoriales*

Según la proposición del párrafo 3, el análisis por el sistema nervioso central de las impresiones sensoriales aporta una representación empobrecida y orientada del mundo exterior. Una especie de resumen donde no figura con claridad lo que particularmente interesa al animal en función de su comportamiento específico (es, en suma, un resumen «crítico», tomando la palabra en una acepción complementaria del sentido kantiano). La experiencia demuestra abundantemente que así es realmente. Por ejemplo, el analizador situado detrás del ojo de una rana le permite ver una mosca (es decir, un punto negro) en movimiento, pero no en reposo.[7] De suerte que la rana atrapará a la mosca sólo en vuelo. Es preciso insistir sobre el hecho, probado por el análisis electrofisiológico, de que eso no es el resultado de un comportamiento que haría desdeñar por la rana un punto negro inmóvil, como no representativo, con certeza, de un alimento. La imagen del punto inmóvil se imprime en la retina, pero no es *transmitida;* el sistema no es excitado más que por un objeto en movimiento.

Ciertas experiencias con el gato[8] sugieren una interpretación del hecho misterioso de que un campo reflejando a la vez todos los colores del espectro sea visto como una playa *blanca,* mien-

6. J. Z. Young, *A Model of the Brain,* Oxford University Press (1964).
7. H. B. Barlow, «Journal of Physiology», 119, págs. 69-88 (1953).
8. T. N. Wiesel y D. H. Hubel «J. Neurophysiol.», 29, páginas 1115-1156 (1966).

tras que el blanco es subjetivamente interpretado como ausencia de todo color. Los experimentadores han mostrado que, debido a unas inhibiciones cruzadas entre ciertas neuronas, que responden respectivamente a las diversas longitudes de onda, éstas no mandan señales cuando la retina está expuesta uniformemente a la gama entera de las longitudes de onda visibles. Goethe, y no Newton, tenía, en un sentido subjetivo, razón. Error eminentemente perdonable a un poeta.

Que los animales sean capaces de clasificar objetos o relaciones entre objetos según categorías abstractas, principalmente geométricas, no puede tampoco dudarse: un pulpo o una rata pueden aprender la noción de triángulo, de círculo o de cuadrado y reconocer sin error estas figuras por sus propiedades geométricas, independientemente de la dimensión, de la orientación o del color que pueda tener el objeto real que se les presente.

El estudio de los circuitos, que analizan las figuras presentadas en el campo de visión del gato, demuestra que estas hazañas geométricas son debidas a la estructura misma de los circuitos que filtran y recomponen, en definitiva, sus propias restricciones a la imagen, de la que extraen ciertos elementos simples. Algunas células nerviosas, por ejemplo, no responden más que a la figura de una línea recta inclinada en sentido inverso. Las «nociones» de la geometría elemental no están pues tan representadas en el objeto como por el analizador sensorial, que lo percibe y recompone a partir de sus elementos más simples.[9]

## *Innatismo y empirismo*

Estos modernos descubrimientos dan pues la razón, en un sentido nuevo, a Descartes y a Kant, y la niegan al empirismo radical que sin embargo no ha cesado casi de reinar en la ciencia desde hace doscientos años, sospechando de toda hipótesis que suponía la «innatividad» de los cuadros del conocimiento. Aún en nuestros días ciertos etólogos parecen ligados a la idea de que los elementos del comportamiento, en el animal, son o bien innatos o bien aprendidos, excluyendo cada modelo al otro. Esta concepción es enteramente errónea como Lorenz ha demostrado

9. D. H. Hubel y T. N. Wiesel, «Journal of Physiology», 148, págs. 574-591 (1959).

enérgicamente.[10] Cuando el comportamiento implica elementos adquiridos por la experiencia, lo son según un *programa* que es innato, es decir genéticamente determinado. La estructura del programa convoca y guía el aprendizaje que se inscribirá pues en una cierta «forma» preestablecida, definida en el patrimonio genético de la especie. Es sin duda así cómo es preciso interpretar el proceso de aprendizaje primario del lenguaje en el niño (cf. cap. 7). No hay ninguna razón para suponer que no sea igual para las categorías fundamentales del conocimiento en el hombre, y quizá también para el individuo y la sociedad. Tales problemas son en principio accesibles a la experiencia. Los etólogos tratan casos parecidos todos los días. Experiencias crueles, que es inimaginable practicar en el hombre, en el niño concretamente. De modo que, por respeto a sí mismo, el hombre no puede más que prohibirse explorar ciertas estructuras constitutivas de su ser.

La larga controversia sobre la innatividad cartesiana de las «ideas», negada por los empiristas, recuerda la que ha dividido a los biólogos con motivo de la distinción entre fenotipo y genotipo. Distinción fundamental, indispensable a la misma definición del patrimonio hereditario para los genetistas que la habían introducido, pero muy sospechosa a los ojos de muchos biólogos no genetistas que no veían en ella más que un artificio destinado a salvar el postulado de invariancia del gen. Se encuentra aquí, una vez más, la oposición entre los que no quieren conocer más que el objeto actual, concreto, en su entera presencia, y los que buscan discernir la representación enmascarada de una forma ideal. No hay más que dos clases de sabios, decía Alain: los que aman las ideas y los que las aborrecen. Estas dos actitudes de espíritu se oponen todavía en la ciencia; y son, una y otra, por su confrontación, necesarias a sus progresos. No se puede más que lamentar, para los despreciadores de ideas, que este progreso, al que contribuyen, invariablemente les perjudique.

En un sentido muy importante, los grandes empiristas del siglo XVIII no se equivocaban sin embargo. Es perfectamente verdadero que todo, en los seres vivos, viene de la experiencia, comprendida la innatividad genética, sea ésta la del comporta-

10. K. Lorenz, *Evolution and Modification of Behavior,* University of Chicago Press, Chicago (1965).

miento estereotípico de las abejas o la de los cuadros innatos del conocimiento humano. Pero no de la experiencia actual, renovada por cada individuo, en cada generación: de la acumulada por la ascendencia entera de la especie en el curso de la evolución. Sólo esta experiencia extraída al azar, sólo estas tentativas innumerables, corregidas por la selección, podían, como de todo otro órgano, hacer del sistema nervioso central un sistema adaptado a su función particular. Para el cerebro: dar del mundo sensible una representación adecuada a las *performances* de la especie, suministrar el cuadro que permita clasificar eficazmente los datos en sí mismos inutilizables de la experiencia inmediata e incluso, en el hombre, simular subjetivamente la experiencia para anticipar los resultados y preparar la acción.

## *La función de simulación*

Son el poderoso desarrollo y el uso intensivo de la función de simulación los que me parecen caracterizar las propiedades únicas del cerebro humano. Esto al nivel más profundo de las funciones cognitivas, sobre el que reposa el lenguaje y que sin duda no explicita sino en parte. Esta función sin embargo no es exclusivamente humana. El perro, que manifiesta su alegría viendo a su amo prepararse para el paseo, imagina evidentemente, es decir simula por anticipación, los descubrimientos que hará, las aventuras que le esperan, los espantos deliciosos que experimentará, sin peligro, gracias a la tranquilizante presencia de su protector. Más tarde, simulará todo ello de nuevo, confusamente mezclado, en sueños. En el animal, como también en el niño pequeño, la simulación subjetiva no parece más que parcialmente disociada de la actividad neuromotriz. Su ejercicio se traduce por el juego. Pero, en el hombre, la simulación subjetiva deviene la función superior por excelencia, la función creadora. Es ella la que es reflejada por la simbólica del lenguaje que la explicita transponiendo y resumiendo sus operaciones. De ahí, el hecho, subrayado por Chomsky, de que el lenguaje, incluso en sus más humildes empleos, es casi siempre innovador: traduce una experiencia subjetiva, una simulación particular, siempre nueva. Es en esto también en lo que el lenguaje humano difiere radicalmente de la comunicación animal. Ésta se reduce a llamadas y avisos que corresponden a un cierto número de situaciones concretas estereotipadas. El animal más inteligente, capaz sin duda de

simulaciones subjetivas bastante precisas, no dispone de ningún medio de «liberar su conciencia», si no es indicando groseramente en qué *sentido* anda su imaginación. El hombre sabe narrar sus experiencias subjetivas: la experiencia nueva, el encuentro creador no perece ya con aquél en que ella habrá sido, por primera vez, simulado.

Todos los hombres de ciencia han debido, pienso yo, darse cuenta de que su reflexión, a nivel profundo, es verbal: es una *experiencia imaginaria,* simulada con la ayuda de formas, de fuerzas, de interacciones que no componen apenas una «imagen» en el sentido visual del término. Yo mismo me he sorprendido, no teniendo, a fuerza de atención centrada en la experiencia imaginaria, nada más en el campo de la conciencia, al identificarme a una molécula de proteína. Sin embargo no es en este momento cuando aparece la significación de la experiencia simulada, sino solamente una vez explicitada simbólicamente. No creo en efecto que haga falta considerar las imágenes no visuales sobre las que opera la simulación como símbolos, sino más bien, si me atrevo a decirlo, como la «realidad» subjetiva y abstracta, directamente ofrecida a la experiencia imaginaria.

Sea cual sea, en el uso corriente, el proceso de simulación está enteramente enmascarado por la palabra que le sigue casi inmediatamente y parece confundirse con el mismo pensamiento. Pero se sabe que numerosas observaciones objetivas prueban que en el hombre las funciones cognitivas, incluso complejas, no están inmediatamente ligadas a la palabra (o a cualquier otro medio de expresión simbólica). Se pueden citar principalmente los estudios hechos sobre diversos tipos de afasias. Quizá las experiencias más impresionantes son las, recientes, de Sperry,[11] sobre sujetos cuyos dos hemisferios cerebrales habían sido separados por sección quirúrgica del *corpus callosum.* El ojo derecho y la mano derecha, en estos sujetos, no comunican información más que al hemisferio izquierdo, y recíprocamente. Así, un objeto visto por el ojo izquierdo, o palpado por la mano izquierda, es reconocido, sin que el sujeto pueda nombrarlo. O en ciertos tests difíciles, donde se trataba de emparejar la forma (tridimensional) de un objeto, tenido en una de las dos manos, al desarrollo *plano* de esta forma, representado en una pantalla, el hemisferio derecho (afásico) se mostraba, con mucho, superior al hemisferio

11. J. Levi-Agresti y R. W. Sperry, *Proceedings of the National Academy of Sciences,* 61, pág. 1151 (1968).

«dominante» (izquierdo), y más rápido en la discriminación. Resulta tentador especular sobre la posibilidad de que una parte importante, quizá la más «profunda» de la simulación objetiva, esté asegurada por el hemisferio derecho.

* * *

Si es legítimo considerar que el pensamiento reposa sobre un proceso de simulación subjetiva, es preciso admitir que el alto desarrollo de esta facultad en el hombre es resultado de una evolución en el curso de la cual es en la acción concreta, preparada por la experiencia imaginaria, donde la eficacia de este proceso, su valor de supervivencia, ha sido probado por la selección. Es pues por su capacidad de representación adecuada y de previsión exacta, *confirmada por la experiencia concreta,* por la que el poder de simulación del sistema nervioso central, en nuestros antepasados, ha sido empujado hasta el estado alcanzado en el *Homo sapiens.* El simulador subjetivo no tenía drecho a equivocarse cuando se trataba de organizar una cacería de panteras con las armas que disponía el Australántropo, el Pitecántropo, o incluso el *Homo sapiens* de Cro-Magnon. Por eso es por lo que el instrumento lógico innato, heredado de nuestros antepasados, no nos engaña y nos permite «comprender» los acontecimientos del universo, es decir, describirnos en lenguaje simbólico y preverlo, con tal de que los elementos de información necesarios sean suministrados al simulador.

Instrumento de anticipación, enriqueciéndose sin cesar de los resultados de sus propias experiencias, el simulador es el instrumento del descubrimiento y de la creación. Es el análisis de la lógica de su funcionamiento subjetivo el que ha permitido formular las reglas de la lógica objetiva y crear nuevos instrumentos simbólicos, como las matemáticas. Grandes espíritus (Einstein) a menudo se maravillan, con razón, del hecho de que los entes matemáticos creados por el hombre puedan representar tan fielmente a la naturaleza sin deberle ellos nada a la experiencia. Nada, es cierto, a la experiencia individual y concreta, pero todo a las virtudes del simulador forjado por la experiencia innumerable y cruel de nuestros humildes antepasados. Confrontando sistemáticamente la lógica y la experiencia, según el método científico, es de hecho toda la experiencia de nuestros antepasados la que confrontamos con la experiencia actual.

* * *

Si podemos adivinar la existencia de este maravilloso instrumento, si sabemos traducir, por el lenguaje, el resultado de sus operaciones, no tenemos ninguna idea de su funcionamiento, de su estructura. La experimentación fisiológica es, bajo este aspecto, importante todavía. La introspección, con todos sus peligros, nos ha dicho pese a todo un poco más. Queda el análisis del lenguaje que sin embargo no revela el proceso de simulación más que a través de transformaciones desconocidas y no aclara, sin duda, todas sus operaciones.

*La ilusión dualista y la presencia del espíritu*

He aquí la frontera, casi tan infranqueable todavía para nosotros como lo era para Descartes. En tanto no es franqueada, el dualismo conserva en suma su verdad operacional. La noción de cerebro y la de espíritu no se confunden menos ahora que en el siglo XVII. El análisis objetivo nos obliga a ver una ilusión en el dualismo aparente del ser. Ilusión sin embargo tan íntimamente ligada al mismo ser que sería sumamente vano esperar disiparla en la aprehensión inmediata de la subjetividad, o aprender a vivir afectivamente, moralmente, sin ella. Y además, ¿qué falta hace? ¿Quién podría dudar de la presencia del espíritu? Renunciar a la ilusión que ve en el alma una «sustancia» inmaterial, no es negar su existencia, sino al contrario comenzar a reconocer la complejidad, la riqueza, la insondable profundidad de la herencia genética y cultural, como de la experiencia personal, consciente o no, que en conjunto constituyen el ser que somos, único e irrecusable testigo de sí mismo.

# 9

# El reino y las tinieblas

*Presiones de selección en la evolución del hombre*

Como ya dijimos, el día en que el Australántropo, o alguno de sus congéneres, llegó a comunicar, no sólo una experiencia concreta y actual, sino el contenido de una experiencia subjetiva, de una «simulación» personal, nació un nuevo reino: el de las ideas. Una nueva evolución, la de la cultura, se hacía posible. La evolución física del hombre debía proseguirse aún durante mucho tiempo, estrechamente asociada en adelante a la del lenguaje, sufriendo profundamente su influencia que trastornaba las condiciones de la selección.

El hombre moderno es el producto de esta simbiosis evolutiva. Él es incomprensible, indescifrable, en cualquier otra hipótesis. Todo ser vivo es *también* un fósil. Lleva en sí, y hasta en la estructura microscópica de sus proteínas, las huellas, si no los estigmas, de su ascendencia. Esto es más cierto en el hombre que en cualquier otra especie animal, en razón de la dualidad, física e «ideal», de la evolución de la que él es el heredero.

Se puede pensar que, durante centenas de milenios, la evolución ideal ha precedido muy de cerca a la evolución física que la constreñía por el débil desarrollo de un córtex capaz solamente de anticipar acontecimientos directamente ligados a la inmediata supervivencia. De ahí, la intensa presión de selección que debía empujar al desarrollo del poder de simulación y del lenguaje que explicita las operaciones. Por ello también, la rapidez, sorprendente, de esta evolución que testimonian los cráneos fósiles.

Pero a medida que proseguía esta evolución conjunta, su

componente ideal no podía más que independizarse respecto a los apremios que iniciaban poco a poco el desarrollo del sistema nervioso central. Debido a esta evolución, el hombre extendía su dominio sobre el universo subhumano y sufría menos los peligros que le acechaban. La presión de selección que había guiado la primera fase de la evolución podía entonces aflojarse y, en todo caso, tomar otro carácter. Dominando en adelante sus cercanías, el hombre no tenía ya frente a sí más adversario serio que él mismo. La lucha intraespecífica directa, la lucha a muerte, se convertía desde entonces en uno de los principales factores de selección en la especie humana. Fenómeno extremadamente raro en la evolución de los animales. En el presente, la guerra intraespecífica, entre razas o grupos distintos, es desconocida en las especies animales. En los grandes mamíferos, incluso en el combate singular, frecuente entre machos, es extremadamente rara la muerte del vencido. Todos los especialistas están de acuerdo en pensar que la lucha directa, la *struggle for life* de Spencer, no ha jugado más que un pequeño papel en la evolución de las especies. No sucede igual en el hombre. A partir al menos de un cierto grado de desarrollo y de expansión de la especie, la guerra tribal o racial ha jugado evidentemente un papel importante como factor de evolución. Es muy posible que la brutal desaparición del hombre de Neanderthal fuera el resultado de un genocidio cometido por nuestro antepasado *Homo sapiens*. Éste no debía ser el último: se conocen bastantes genocidios históricos.

¿En qué sentido esta presión de selección debía empujar la evolución humana? Desde luego pudo favorecer la expansión de las razas mejor dotadas de inteligencia, de imaginación, de voluntad, de ambición. Pero también debió favorecer la cohesión de la banda, la agresividad del grupo más aún que el valor solitario, y el respeto de las leyes de la tribu más que la iniciativa individual.

Acepto todas las críticas que se quieran hacer a este esquema simplista. No pretendo dividir la evolución humana en dos fases distintas. No he intentado más que enumerar las principales presiones de selección que, ciertamente, han jugado un papel muy importante en la evolución no sólo cultural, sino física del hombre. El punto importante es que, durante centenares de miles de años, la evolución cultural no podía dejar de influenciar la evolución física; en el hombre, más aún que en cualquier otro animal, e incluso en razón de su autonomía infinitamente supe-

rior, es el *comportamiento* el que *orienta* la presión de selección. Y a partir del momento en que el comportamiento cesa de ser principalmente automático para hacerse cultural, los mismos rasgos culturales ejercen su presión sobre la evolución del genoma.

Esto, sin embargo, hasta el momento en que la rapidez creciente de la evolución cultural hace que ésta se disocie completamente de la del genoma.

*Peligros de degradación genética en las sociedades modernas*

Es evidente que, en el seno de las sociedades modernas, la disociación es total. La selección ha sido suprimida. Al menos ya no tiene nada de «natural» en el sentido darwiniano del término. En nuestras sociedades, y en la medida en que rige todavía una selección, ella no favorece la «supervivencia del más apto», es decir, en términos más modernos, la supervivencia genética del «más apto», por una expansión más grande de su descendencia. La inteligencia, la ambición, el coraje, la imaginación, son siempre factores de éxito en las sociedades modernas. Pero de éxito *personal*, y no *genético*, que es el único que cuenta para la evolución. Como todos sabemos, las estadísticas revelan una correlación negativa entre el cociente de inteligencia (o el nivel de cultura) de los matrimonios y el número medio de hijos. Estas mismas estadísticas demuestran por el contrario que existe, para el cociente de inteligencia, una fuerte correlación positiva entre esposos. Situación peligrosa, que corre el riesgo de atraer poco a poco hacia una *elite*, que tendería en valor relativo a restringirse, el más elevado potencial genético.

Todavía hay más: en una época reciente, incluso en las sociedades relativamente «avanzadas», la eliminación de los menos aptos, física y también intelectualmente, era automática y cruel. La mayoría no alcanzaba la pubertad. Hoy, muchos de estos enfermizos genéticos sobreviven lo bastante como para reproducirse. Gracias a los progresos del conocimiento y de la ética social, el mecanismo que defendía a la especie contra la degradación, inevitable al abolirse la selección natural, ya no funciona más que para las tareas muy graves.

A estos peligros, a menudo señalados, se han opuesto a veces los remedios alcanzados por los recientes progresos de la genética molecular. Es preciso disipar esta ilusión, extendida por algunos pseudocientíficos. Sin duda se podrían paliar ciertas ta-

ras genéticas, *pero solamente en el individuo que las padece,* no en su descendencia. No sólo la genética molecular moderna no nos propone *ningún medio* de actuar en el patrimonio hereditario para enriquecerle con nuevos rasgos, para crear un «superhombre» genético, sino que revela la vanidad de una esperanza así: la escala microscópica del genoma prohíbe por el momento, y sin duda para siempre, tales manipulaciones. Aparte de las quimeras de ciencia ficción, el único medio de «mejorar» la especie humana sería operar una selección deliberada y severa. Pero, ¿quién querrá, quién osará emplearla?

El peligro, para la especie, de las condiciones de no selección, o de selección al revés, que reinan en las sociedades avanzadas, es cierto. No llegará sin embargo a ser realmente serio más que a largo plazo: digamos diez o quince generaciones, varios siglos. Pero, las sociedades modernas están expuestas por otro lado a amenazas más apremiantes y graves.

* * *

No me refiero aquí a la explosión demográfica, a la destrucción de la naturaleza, ni incluso a los megatones; sino a un mal mucho más profundo y grave, a un mal del alma. Éste es el giro más grande de la evolución ideal que la ha creado y sin cesar la agrava. El prodigioso desarrollo del conocimiento desde hace tres siglos, constriñe hoy al hombre a una revisión desgarradora de la concepción, arraigada desde hace decenas de miles de años, que él tenía de sí mismo y de su relación con el universo.

Todo esto, sin embargo, el mal del alma y la potencia de los megatones, nos viene de una idea simple: la naturaleza les objetiva, la verdad del conocimiento no puede tener otra fuente que la confrontación sistemática de la lógica y de la experiencia. No se acaba de comprender cómo no ha podido, en el reino de las ideas, aquélla, tan simple y tan clara, aparecer con toda claridad más que cien mil años después de la emergencia del *Homo sapiens;* cómo las más elevadas civilizaciones, la china por ejemplo, la ignoran, para tomarla luego de Occidente; cómo, en el mismo Occidente, han sido precisos cerca de 2.500 años, de Tales y Pitágoras a Galileo, Descartes, Bacon, para que, por fin, ella se desprenda de la ganga que la encerraba en la pura práctica de las artes mecánicas.

## *La selección de las ideas*

Es tentador, para un biólogo, comparar la evolución de las ideas a la de la biosfera. Porque el reino abstracto trasciende la biosfera más aún que ésta al universo no vivo, las ideas han conservado algunas de las propiedades de los organismos. Como éstos tienden a perpetuar su estructura y a multiplicarla, pueden fusionar, recombinar, segregar su contenido y, en fin, evolucionar, y, en esta evolución, la selección, sin ninguna duda, juega un gran papel. No me aventuraría a proponer una teoría de la selección de las ideas. Pero se puede al menos intentar definir algunos de los principales factores que desempeñan un papel. Esta selección debe necesariamente operar a dos niveles: el del espíritu y el de la *performance*.

El valor de *performance* de una idea depende de la modificación de comportamiento que aporta al individuo o al grupo que la adopta. Aquélla que confiera al grupo humano que la hace suya, más cohesión, ambición, confianza en sí, le dará de hecho un aumento de poder de expansión que asegurará la promoción de la misma idea. Este valor de promoción no tiene necesariamente relación con la parte de verdad objetiva que la idea pueda comportar. La poderosa armadura que para una sociedad constituye una ideología religiosa no es debida a su estructura misma, sino al hecho de que esta estructura es aceptada, que se impone. Por ello resulta muy difícil separar el poder de invasión de una idea como ésta y su poder de *performance*.

El poder de invasión, en sí, es mucho más difícil de analizar. Digamos que depende de las estructuras preexistentes del espíritu, entre las que se hallan las ideas ya encaminadas por la cultura pero también, sin ninguna duda, ciertas estructuras innatas que nos son, por otra parte, muy difíciles de identificar. Pero se ve claramente que las ideas dotadas del más alto poder de invasión son las que *explican* el hombre asignándole su lugar en un destino inmanente, en cuyo seno se disuelve su angustia.

## *La exigencia de explicación*

Durante centenares de miles de años el destino de un hombre se confundía con el de su grupo, de su tribu, fuera de la cual no podía sobrevivir. La tribu, en sí, no podía sobrevivir ni defenderse más que por su cohesión. De ahí, el extremo poder subjeti-

vo de las leyes que organizaban y garantizaban esta cohesión. Algún hombre podía a veces infringirlas; ninguno sin duda habría soñado con negarlas. Viendo así la inmensa importancia selectiva que necesariamente asumieron tales estructuras sociales, y durante tan largo período de tiempo, es difícil no pensar que ellas debieron influenciar la evolución genética de las categorías innatas del cerebro humano. Esta evolución debía no sólo facilitar la aceptación de la ley tribal, sino crear la *necesidad* de la explicación mítica que la cimenta, confiriéndole la soberanía. Nosotros somos los descendientes de esos hombres. Es de ellos sin duda de quienes hemos heredado la exigencia de una explicación, la angustia que nos constriñe a buscar el sentido de la existencia. Angustia creadora de todos los mitos, de todas las religiones, de todas las filosofías y de la ciencia misma.

Que esta imperiosa necesidad sea innata, inscrita de algún modo en el lenguaje del código genético, que se desarrolle espontáneamente, no lo dudo por mi parte. Fuera de la especie humana, no se encuentran en el reino animal organizaciones sociales tan altamente diferenciadas, a no ser en algunos insectos: hormigas, termitas o abejas. En los insectos sociales la estabilidad de las instituciones no debe prácticamente nada a una herencia cultural, sino todo a la transmisión genética. El comportamiento social es enteramente innato, automático.

En el hombre, las instituciones sociales, puramente culturales, no podrán jamás alcanzar una estabilidad así; además ¿quién la desearía? La invención de los mitos y de las religiones, la construcción de vastos sistemas filosóficos, son el precio que el hombre debe pagar para sobrevivir como animal social sin caer en un puro automatismo. Pero la herencia puramene cultural no sería bastante segura, bastante poderosa por sí sola, para mantener las estructuras sociales. Faltaba a esta herencia un soporte genético que se convirtiera en el alimento exigido por el espíritu. Si ello no es así, ¿cómo explicar la universalidad, en nuestra especie, del fenómeno religioso en la base de la estructura social? ¿Cómo explicar además que en la inmensa diversidad de mitos, religiones o ideologías filosóficas, se encuentre la misma «forma» esencial?

*Las ontogenias míticas y metafísicas*

Es fácil ver que las «explicaciones», destinadas a fundar la ley aplacando la angustia, son en su totalidad «historias» o, más exactamente, ontogenias. Los mitos primitivos se refieren casi todos a héroes más o menos divinos cuya gesta explica los orígenes del grupo y funda su estructura social sobre tradiciones intocables: no se rehace la historia. Las grandes religiones tienen la misma configuración; basándose en la historia de la vida de un profeta inspirado que, si no es él mismo el fundador de todas las cosas, le representa, habla por él y cuenta la historia de los hombres así como su destino. De todas las grandes religiones, la judeocristiana es sin duda la más «primitiva» por su estructura historicista, directamente ligada a la gesta de una tribu beduina, antes de ser enriquecida por un profeta divino. El budismo, al contrario, más altamente diferenciado, está ligado únicamente, en su forma original, al karma, la ley transcendente que rige el destino individual. Es una historia de almas, más que de hombres.

De Platón a Hegel y Marx, los grandes sistemas filosóficos proponen en su totalidad ontogenias a la vez explicativas y normativas. En Platón, es cierto, la ontogenia está al revés. En la historia él no ve más que corrupción gradual de las formas ideales y, en la *República*, es una máquina del tiempo lo que él, en suma, quiere poner en marcha.

Para Marx, como para Hegel, la historia se desarrolla según un plan inmanente, necesario y favorable. El inmenso poder sobre los espíritus de la ideología marxista, no es debido solamente a su promesa de una liberación del hombre, sino también, y sin duda ante todo, a su estructura ontogénica, a la explicación que da, entera y detallada, de la historia pasada, presente y futura. Sin embargo, limitado a la historia humana e incluso adornado de las certidumbres de la «ciencia», el materialismo histórico quedaba incompleto. Era preciso añadirle el materialismo dialéctico, que aporta la interpretación total que exige el espíritu: la historia humana y la del cosmos están asociadas como obedeciendo a las mismas leyes eternas.

## *La ruptura de la «antigua alianza» animista y el mal del alma moderna*

Si es cierto que la necesidad de una explicación entera es innata, que su ausencia es causa de profunda angustia; si la única forma de explicación, que sabe aplacar la angustia, es la de una historia total que revele la significación del hombre asignándole en los planes de la naturaleza un lugar necesario; si para parecer verdadera, significante, apaciguante, la «explicación» debe fundarse en la larga tradición animista,[1] se comprende entonces por qué han sido precisos tantos milenios para que aparezcan en el reino de las ideas las del conocimiento objetivo como *única* fuente de verdad auténtica.

Esta idea austera y fría, que no propone ninguna explicación, pero que impone un ascético renunciamiento a cualquier otro sustento espiritual, no podía calmar la angustia innata; al contrario, la exasperaba. Ella pretendía, de un trazo, borrar una tradición cien veces milenaria, asimilada a la misma naturaleza humana; denunciaba la antigua alianza animista del hombre con la naturaleza, no dejando, en el lugar de este precioso nexo, más que una búsqueda ansiosa en un universo helado de soledad. ¿Cómo una idea así, que parecía estar revestida de una puritana arrogancia, podía ser aceptada? No lo ha sido; no lo es aún. Y si a pesar de todo se ha impuesto, es en razón, únicamente, de su prodigioso poder de *performance*.

En tres siglos, la ciencia, fundada por el postulado de objetividad, ha conquistado su lugar en la sociedad: en la práctica, mas no en las almas. Las sociedades modernas están construidas sobre la ciencia. Le deben su riqueza, su poderío y la certeza de que riquezas y poderes, aun mucho mayores, serán mañana, si él lo quiere, accesibles al hombre. Pero también, igual que una «elección» inicial en la evolución biológica de una especie puede comprometer el porvenir de toda su descendencia, igual la elección, inconsciente en el origen, de una *práctica* científica ha lanzado la evolución de la cultura por un camino de sentido único; trayecto que el progresismo cientista del siglo XIX veía desembocar infaliblemente en una expansión prodigiosa de la humanidad, mientras que hoy vemos abrirse delante nuestro un abismo de tinieblas.

1. Quizá sea preciso subrayar de nuevo que empleo este calificado en un sentido particular, definido en el cap. 2 (cf. páginas 40 y 41).

Las sociedades modernas han aceptado las riquezas y los poderes que la ciencia les descubría. Pero no han aceptado, apenas han entendido, el profundo mensaje de la ciencia: la definición de una nueva y única fuente de verdad, la exigencia de una revisión total de los fundamentos de la ética, de una radical ruptura con la tradición animista, el abandono definitivo de la «antigua alianza», la necesidad de forjar una nueva. Armadas de todos los poderes, disfrutando de todas las riquezas que deben a la Ciencia, nuestras sociedades intentan aún vivir y enseñar sistemas de valores ya arruinados, en su raíz, por esta misma ciencia.

Ninguna sociedad, antes de la nuestra, ha conocido semejante desgarramiento. En las culturas primitivas como en las clásicas, las fuentes del conocimiento y las de los valores eran confundidas por la tradición animista. Por primera vez en la historia, una civilización intenta edificarse permaneciendo desesperadamente ligada, para justificar sus valores, a la tradición animista, totalmente abandonada como fuente de conocimiento, de *verdad*. Las sociedades «liberales» de Occidente enseñan aún, con desdén, como base de su moral, una repugnante mezcla de religiosidad judeocristiana, de progresismo cientista, de creencia en los derechos «naturales» del hombre y de pragmatismo utilitarista. Las sociedades marxistas profesaron siempre la religión materialista y dialéctica de la historia; cuadro moral más sólido en apariencia que el de las sociedades liberales, pero más vulnerable quizás en razón de la misma rigidez que hasta ahora constituía su fuerza. Sea el que sea, todos estos sistemas enraizados en el animismo están fuera del conocimiento objetivo, fuera de la verdad, extraños y en definitiva *hostiles* a la ciencia, que quieren utilizar, mas no respetar y servir. El divorcio es tan grande, la mentira tan flagrante, que asedia y desgarra la conciencia de todo hombre provisto de alguna cultura, dotado de alguna inteligencia y habitado por esta ansiedad moral que es la fuente de toda creación. Es decir de todos aquellos, entre los hombres, que llevan o llevarán las responsabilidades de la sociedad y de la cultura en su evolución.

El mal del alma moderna es esta mentira, en la raíz del ser moral y social. Es este mal, más o menos confusamente diagnosticado, que provoca el sentimiento de temor, si no de odio, en cualquier caso de alienación, que hoy experimentan tantos hombres respecto a la cultura científica. Lo más a menudo es hacia los subproductos tecnológicos de la ciencia a los que se expresa

abiertamente la aversión: la bomba, la destrucción de la Naturaleza, la amenazadora demografía. Es fácil, desde luego, replicar que la tecnología no es la ciencia y que, además el empleo de la energía atómica será, pronto, indispensable para la sobrevivencia de la humanidad; que la destrucción de la naturaleza denuncia una tecnología insuficiente y no precisamente demasiada tecnología; que la explosión demográfica es debida a que millones de niños son salvados de la muerte cada año: ¿es preciso de nuevo dejarlos morir?

Discurso superficial, que confunde los signos con las causas profundas del mal. Es claramente al mensaje esencial de la ciencia al que se dirige la repulsa. El miedo está en el sacrilegio: en el atentado a los valores. Miedo enteramente justificado. Es muy cierto que la ciencia atenta contra los valores. No directamente, ya que no es juez y *debe* ignorarlos; pero ella arruina todas las ontogenias míticas o filosóficas sobre las que la tradición animista, de los aborígenes australianos a los dialécticos materialistas, hace reposar los valores, la moral, los deberes, los derechos, las prohibiciones.

Si acepta este mensaje en su entera significación, le es muy necesario al hombre despertar de su sueño milenario para descubrir su soledad total, su radical foraneidad. Él sabe ahora que, como un zíngaro, está al margen del universo donde debe vivir. Universo sordo a su música, indiferente a sus esperanzas, a sus sufrimientos y a sus crímenes.

Pero entonces ¿quién define el crimen? ¿Quién el bien y el mal? Todos los sistemas tradicionales colocan la ética y los valores fuera del alcance del hombre. Los valores no le pertenecen: ellos se imponen y es él quien les pertenece. Él sabe ahora que ellos son sólo suyos y, al ser en fin el dueño, le parece que se disuelven en el vacío indiferente del universo. Es entonces cuando el hombre moderno se vuelve hacia, o mejor, contra la ciencia de la que calibra ahora el terrible poder de destrucción, no sólo de los cuerpos, sino de la misma alma.

*Los valores y el conocimiento*

¿Dónde está la solución? ¿Es preciso admitir definitivamente que la verdad objetiva y la teoría de los valores constituyen para siempre terrenos opuestos, impenetrables uno por el otro? Es la actitud que parecen tomar una gran parte de los pensadores

modernos, sean escritores, filósofos, o incluso hombres de ciencia. Yo la creo no sólo inaceptable para la inmensa mayoría de los hombres, sino absolutamente errónea, y ello por dos razones esenciales:

— en primer lugar, desde luego, porque los valores y el conocimiento están siempre y necesariamente asociados tanto en la acción como en el discurso;

— a continuación y principalmente, porque *la definición misma del conocimiento «verdadero» se basa, en último término, en un postulado de orden ético.*

Cada uno de estos dos puntos necesita un pequeño desarrollo. La ética y el conocimiento están inevitablemente ligados en la acción y por ella. La acción pone en juego, o en cuestión, *a la vez* el conocimiento y los valores. Toda acción significa una ética, escoge o rechaza ciertos valores; constituye unos valores escogidos, o lo pretende. Pero, por otra parte, un conocimiento es necesariamente supuesto en toda acción, mientras que, en compensación, la acción es una de las dos fuentes necesarias del conocimiento.

En un sistema animista, la interpretación de la ética y del conocimiento no plantea ningún conflicto, ya que el aninismo evita toda distinción radical entre estas dos categorías: las considera como dos aspectos de una misma realidad. La idea de una ética social fundada sobre los «derechos» supuestos «naturales» del hombre expresa una actitud tal que se revela también, pero de modo mucho más sistemático y afirmado, en las tentativas de explicitación de la moral implícita del marxismo.

Desde el momento en que se propone el postulado de objetividad, como condición necesaria de toda verdad en el conocimiento, una distinción radical, indispensable en la búsqueda de la verdad, es establecida entre el dominio de la ética y el del conocimiento. El conocimiento en sí mismo es exclusivo de todo juicio de valor (en tanto que «de valor epistemológico») mientras que la ética, por esencia *no objetiva,* está por siempre excluida del campo del conocimiento.

En definitiva es esta distinción radical, propuesta como un axioma, la que ha creado a la ciencia. Estoy tentado aquí de hacer notar que, si este acontecimiento único en la historia de la cultura se produjo en el Occidente cristiano antes que en el seno de otra civilización, es quizá, por una parte, gracias al hecho de que la Iglesia reconocía una distinción fundamental entre el dominio de lo sagrado y el de lo profano. Esta distinción no permi-

tió a la ciencia solamente buscar sus vías (a condición de no usurpar el dominio de lo sagrado), sino que preparó al espíritu para la distinción mucho más radical que proponía el principio de objetividad. Los occidentales pueden sentir cierta pena al ver que para algunas religiones no existe, no puede existir, ninguna distinción entre lo sagrado y lo profano. Para el hinduismo todo pertenece al dominio sagrado; la misma noción de «profano» es incomprensible.

Esto no era más que un paréntesis. Volvamos al asunto. El postulado de objetividad, al denunciar la «antigua alianza», impide al mismo tiempo toda confusión entre juicios de conocimiento y juicios de valor. Pero sucede que estas dos categorías están inevitablemente asociadas en la acción, comprendido el discurso. Para permanecer fieles al principio, juzgaremos pues que todo discurso (o acción) no debe ser considerado como significante, como *auténtico,* más que si (o en la medida en que) explicita y conserva la distinción de las dos categorías que él asocia. La noción de autenticidad deviene, así definida, el dominio común donde se reúnen la ética y el conocimiento; donde los valores y la verdad, asociados pero no confundidos, revelan su entera significación al hombre atento que experimenta la resonancia. Por el contrario, el discurso *inauténtico,* en el que las dos categorías se amalgaman y confunden, no puede conducir más que a los contrasentidos más perniciosos, a las mentiras más criminales, aunque sean inconscientes.

Se ve perfectamente que es en el discurso «político» (siempre interpreto «discurso» en el sentido cartesiano) donde esta peligrosa amalgama se practica de forma más constante y sistemática. Y ello no sólo por los políticos de vocación. Los mismos hombres de ciencia, fuera de su dominio, se revelan a menudo peligrosamente incapaces de distinguir la categoría de valores de la del conocimiento.

Pero esto era otro paréntesis. Volvamos a las fuentes del conocimiento. El animismo, hemos dicho, no quiere ni puede, por otra parte, establecer una discriminación absoluta entre proposiciones de conocimiento y juicios de valor; ya que, si una intención, por cuidadosamente disfrazada que esté, se supone presente en el Universo, ¿qué sentido tendría una distinción así? En un sistema objetivo, al contrario, toda confusión entre conocimiento y valores está *prohibida.* Mas (y éste es el punto esencial, la articulación lógica que asocia, en la raíz, conocimiento y valores) esta prohibición, este «primer mandamiento» que funda

el conocimiento objetivo, no es en sí mismo y no sabría ser objetivo: es una regla moral, una *disciplina*. El conocimiento verdadero ignora los valores, pero hace falta para fundamentarlo un juicio, o más bien un *axioma* de valor. Es evidente que el plantear el postulado de objetividad como condición del conocimiento verdadero *constituye una elección ética y no un juicio de conocimiento, ya que, según el mismo postulado, no podía haber conocimiento «verdadero» con anterioridad a esta elección arbitraria.* El postulado de objetividad, para establecer la *norma* del conocimiento, define un *valor* que es el mismo conocimiento objetivo. Aceptar el postulado de objetividad, es pues enunciar la proposición de base de una ética: *la ética del conocimiento.*

### *La ética del conocimiento*

En la ética del conocimiento, *es la elección ética de un valor primitivo la que funda el conocimiento.* Por ello difiere radicalmente de las éticas animistas que en su totalidad se consideran fundadas sobre el «conocimiento» de leyes inmanentes, religiosas o «naturales», que se impondrían al hombre. La ética del conocimiento no se impone al hombre; *es él, al contrario, quien se la impone* haciendo de ella *axiomáticamente* la condición de autenticidad de todo discurso o de toda acción. El *Discurso del Método* propone una epistemología normativa, pero es preciso leerlo también y, ante todo, como meditación moral, como ascesis del espíritu.

El discurso auténtico funda a su vez la ciencia y entrega a las manos de los hombres los inmensos poderes que, hoy, le enriquecen y le amenazan, le liberan, pero podrían también esclavizarle. Las sociedades modernas, tejidas por la ciencia, viven de sus productos, han devenido dependientes como un toxicómano de su droga. Ellas deben su poderío material a esta ética fundadora del conocimiento, y su debilidad moral a los sistemas de valores, arruinados por el mismo conocimiento, a los que intentan aún atenerse. Esta contradicción es mortal. Es ella la que excava el abismo que vemos abrirse a nuestro paso. La ética del conocimiento, creadora del mundo moderno, es la única compatible con él, la única capaz, una vez comprendida y aceptada, de guiar su evolución.

* * *

Comprendida y aceptada, ¿podrá serlo? Si es cierto, como creo, que la angustia de la sociedad y la exigencia de una explicación total, apremiante, son innatas; que esta herencia venida del fondo de las edades no es solamente cultural, sino sin duda genética, ¿podemos pensar que esta ética austera, abstracta, orgullosa, pueda calmar la angustia, saciar la exigencia? No lo sé. Mas quizá después de todo no es totalmente imposible. ¿Puede ser que, más que una «explicación» que la ética del conocimiento no sabría dar, el hombre necesite superación y transcendencia? El poderío del gran sueño socialista, siempre vivo en las almas, parece testimoniarlo a la perfección. Ningún sistema de valores puede pretender constituir una verdadera ética, a menos de proponer un ideal que trascienda el individuo al punto de justificar la necesidad por la que él se sacrifica.

Por la misma enjundia de su ambición, la ética del conocimiento podría quizá satisfacer esta exigencia de superación. Ella define un valor transcendente, el verdadero conocimiento, y propone al hombre no sólo servirse de él, sino en adelante servirlo por una elección deliberada y consciente. Sin embargo, ella es también un humanismo, ya que respeta en el hombre al creador y depositario de esta trascendencia.

La ética del conocimiento es, igualmente, en un sentido, «conocimiento de la ética», de los impulsos, de las pasiones, de las exigencias y de los límites del ser biológico. En el hombre, ella sabe ver el animal, no sólo absurdo sino extraño, precioso por su extrañeza misma, el ser que, perteneciendo simultáneamente a dos reinos, la biosfera y el reino de las ideas, está a la vez torturado y enriquecido por este dualismo desgarrador que se expresa tanto en el arte y la poesía como en el amor humano.

La mayoría de los sistemas animistas, por el contrario, han querido ignorar, envilecer o constreñir al hombre biológico, horrorizarle o aterrorizarle con ciertos rasgos inherentes a su condición animal. La ética del conocimiento, por el contrario, estimula al hombre a respetar y a asumir esta herencia, sabiendo, cuando es necesario, dominarla. En cuanto a las más altas cualidades humanas, el ánimo, el altruismo, la generosidad, la ambición creadora, la ética del conocimiento, aun y reconociendo su origen socio-biológico, afirma también su valor transcendente al servicio del ideal que ella define.

*La ética del conocimiento y el ideal socialista*

La ética del conocimiento, en fin, es, en mi opinión, la única actitud a la vez racional y deliberadamente idealista sobre la que podría ser edificado un verdadero socialismo. Este gran sueño del siglo XIX vive perennemente, en las almas jóvenes, con una dolorosa intensidad. Dolorosa a causa de las traiciones que este ideal ha sufrido y de los crímenes cometidos en su nombre. Es trágico, pero quizás inevitable, que esta profunda aspiración no haya encontrado su doctrina filosófica más que bajo la forma de una ideología animista. Es fácil ver que el profetismo historicista fundamentado sobre el materialismo dialéctico estaba, desde su nacimiento, cargado de todas las amenazas que han sido, en efecto, realizadas. Más aún, quizá, que los demás animismos, el materialismo histórico reposa sobre una confusión total de las categorías de valor y de conocimiento. Es esta confusión la que le permite, con un discurso profundamente inauténtico, proclamar que ha establecido «científicamente» las leyes de la historia a las que el hombre no tiene otro recurso ni otro deber que obedecer, si no quiere caer en la nada.

Una vez por todas, es preciso renunciar a esta ilusión que no es más que pueril cuando no es mortal. ¿Cómo un socialismo auténtico podría construirse jamás sobre una ideología inauténtica por esencia, burla de la ciencia sobre la que pretende sinceramente, en el espíritu de sus adeptos, apoyarse? La sola esperanza en el socialismo no está en una «revisión» de la ideología que lo domina desde hace más de un siglo, sino en el abandono total de ella.

¿Dónde entonces encontrar la fuente de verdad y la inspiración moral de un humanismo socialista realmente *científico* sino en las fuentes de la misma ciencia, en la ética que funda el conocimiento, haciendo de él, por libre elección, el valor supremo, medida y garantía de todos los demás valores? Ética que funda la responsabilidad moral sobre la libertad de esta elección axiomática. Aceptada como base de las instituciones sociales y políticas, como medida de su autenticidad, de su valor, únicamente la ética del conocimiento podría conducir al socialismo. Ella impone instituciones consagradas a la defensa, a la extensión, al enriquecimiento del reino transcendente de las ideas, del conocimiento, de la creación. Reino que habita el hombre y en donde, cada vez más liberado de los apremios materiales y de las servidumbres mentirosas del animismo, podría al fin vivir auténtica-

mente, protegido por instituciones que, viendo en él a la vez al sujeto y al creador del reino, deberían servirle en su esencia más única y más preciosa.

Esto es quizás una utopía. Pero no es un sueño incoherente. Es una idea que se impone por la sola fuerza de su coherencia lógica. Es la conclusión a la que lleva necesariamente la búsqueda de la autenticidad. La antigua alianza ya está rota; el hombre sabe al fin que está solo en la inmensidad indiferente del Universo de donde ha emergido por azar. Igual que su destino, su deber no está escrito en ninguna parte. Puede escoger entre el reino y las tinieblas.

# Apéndices

## 1. *Estructura de las proteínas*

Las proteínas son macromoléculas constituidas por la polimerización lineal de cuerpos llamados «aminoácidos». La estructura general de la cadena «polipeptídica» que resulta de esta polimerización es la siguiente:

En esta representación, los círculos blancos y negros y los cuadrados blancos corresponden a diversos grupos de átomos (O = CH; ● = CO; □ = NH), mientras que las letras R1, R2, etc., representan diferentes radicales orgánicos. Los 20 radicales de aminoácidos que son constituyentes universales de las proteínas están representados en la tabla 1.

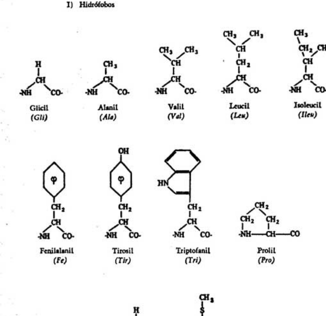
Se ve que la cadena comprende tres tipos de unión entre átomos, o grupos de átomos, a saber:

1.º entre círculo blanco y círculo negro (CH - CO);
2.º entre círculo blanco y cuadrado blanco (CH - NH);
3.º entre círculo negro y cuadrado blanco (CO - NH).

# Tabla 1

## Radicales aminoácidos

I) Hidrófobos



II) Hidrófilos

Aspartil
*(Asp)*

Asparagil
*(AspN)*

Glutamil
*(Glu)*

Glutaminil
*(GluN)*

Arginil
*(Arg)*

Lisil
*(Lis)*

Histidil
*(His)*

Seril
*(Ser)*

Treonil
*(Tr)*

Esta última unión (llamada «peptídica») es rígida (trazo grueso en la figura pág. 171): ella inmoviliza, uno respecto al otro, los átomos que asocia. Al contrario, las otras dos uniones permiten una libre rotación (flechas punteadas) de los átomos, uno respecto al otro. Esto permite a la fibra polipeptídica plegarse sobre sí misma de modo extremadamente complejo y variado. Sólo el impedimento de los átomos (principalmente los que constituyen los radicales R1, R2, etc.) limita, en principio, estas posibilidades de plegamiento.

Sin embargo (ver pág. 94), en las proteínas globulares nativas, todas las moléculas de una misma especie química (definida por la *secuencia* de los radicales en la cadena) adoptan la misma configuración plegada. La figura 5 da esquemáticamente el recorrido de la cadena polipeptídica en una enzima, la papaína. Se ve lo muy complejo que es este recorrido y, en apariencia, su incoherencia.

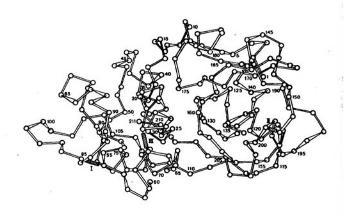
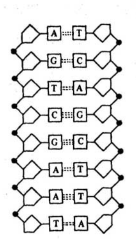



*Fig. 5. Representación esquemática de los pliegues de la cadena peptídica en la molécula de papaína.*

(J. Drenth, J. N. Jansonius, R. Koekoek, H. M. Swen y B. G. Wolthers, «*Nature*», *218, págs. 929-932 (1968).*

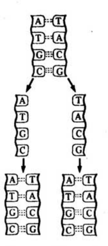



## 2. *Ácidos nucleicos*

Los ácidos nucleicos son macromoléculas que resultan de la polimerización lineal de cuerpos llamados «nucleótidos». Éstos están constituidos por la asociación de un azúcar con una base nitrogenada por una parte, y con un radical fosforilo por otra. La polimerización tiene lugar por mediación de los grupos fosforilos que asocian cada residuo de azúcar al precedente y al siguiente, formando así una cadena «polinucleotídica».

En el ADN (ácido desoxirribonucleico) se encuentran cuatro nucleótidos que difieren por la estructura de la base nitrogenada constituyente. Estas cuatro bases, llamadas adenina, guanina, citosina y timina, se nombran en general A, G, C y T. Son las letras del alfabeto genético. Por razones estéricas, la adenina (A) en el ADN tiende a formar espontáneamente una asociación no covalente (ver pág. 60) con la timina (T) mientras que la guanina (G) se asocia con la citosina (C).

El ADN está constituido por *dos* fibras polinucleotídicas asociadas por mediación de estas uniones no covalentes específicas. En la doble fibra, A de una fibra está asociada a T de otra, G a C; T a A y C a G. Las dos fibras son pues *complementarias.*




Esta estructura está esquemáticamente representada por la figura que viene a continuación, donde los pentágonos simbolizan los radicales de azúcar, los círculos negros los átomos de fósforo que aseguran la continuidad de cada una de las dos cadenas, mientras que los cuadrados A, T, G, C representan las bases emparejadas por pares (A-T; G-C; T-A; C-G) gracias a interacciones no covalentes, indicadas en punteado. La estructura puede componerse de todas las secuencias posibles de pares. No está limitada en cuanto a su longitud.

La *replicación* de esta molécula procede por separación de las dos fibras, seguida por la reconstitución, nucleótido a nucleótido, de las dos complementarias, lo que se puede representar, con notación simplificada y limitándonos a cuatro pares, del modo indicado en la siguiente figura.

Cada una de las dos moléculas así sintetizadas contiene una de las fibras de la molécula madre y una fibra nueva formada por emparejamiento específico, nucleótido. Estas dos moléculas son idénticas entre sí y también a la molécula madre. Así es el mecanismo, muy simple en su principio, de la invariancia replicativa.

Las mutaciones resultan de los diversos tipos de accidentes que pueden afectar a este mecanismo microscópico. Hoy en día se comprende bastante bien el mecanismo químico de algunos de

ellos. Por ejemplo, la sustitución de un par de nucleótidos por otro es debida al hecho de que las bases nitrogenadas pueden, además de su estado «normal», adoptar excepcional y transitoriamente una forma tautomérica en la que la capacidad de emparejamiento específico de la base está en cierto modo «invertido» (por ejemplo la base C, en la forma «excepcional», se empareja con A y no con G). Se conocen agentes químicos que aumentan considerablemente la probabilidad, es decir la frecuencia, de estos emparejamientos «ilícitos». Estos agentes son poderosos «mutágenos».

Otros agentes químicos, capaces de insertarse *entre* los nucleótidos en la fibra de ADN, la deforman y favorecen así los accidentes tales como la eliminación o la adición de uno o varios nucleótidos.

En fin, las radiaciones ionizantes (rayos X y rayos cósmicos) provocan especialmente diversos tipos de eliminaciones o de «mástiques».

### 3. *El código genético*

La estructura y las propiedades de una proteína están definidas por la secuencia (el orden lineal) de los radicales aminoácidos en el polipéptido (cf. pág. 96). Esta secuencia está determinada por la de los nucleótidos en un segmento de fibra del ADN. El código genético *(sensu stricto)* es la regla que asocia, a una secuencia polinucleotídica dada, una secuencia polipeptídica.

Como hay 20 residuos aminoácidos a especificar y sólo 4 «letras» (4 nucleótidos) en el alfabeto del ADN, son precisos varios nucleótidos para especificar un aminoácido. El código, de hecho, es a «tripletes»: cada aminoácido está especificado por una secuencia de *tres nucleótidos.* Las correspondencias están dadas en la tabla 2.

Es preciso notar en primer lugar que la maquinaria de la traducción no utiliza directamente las secuencias nucleotídicas del ADN, sino la «transcripción» de *una* de las dos fibras a un polinucleótido, llamado «ácido ribonucleico mensajero» (ARN mensajero). Los polinucleótidos del ARN difieren de los del ADN por algunos detalles de estructura, principalmente por la sustitución de la base timina (T) por la base *uracilo* (U). Como es el ARN mensajero el que sirve de matriz para el ensamblaje secuencial de los aminoácidos destinados a formar el polipéptido,

## TABLA 2

### EL CÓDIGO GENÉTICO

| I ↓ II → | U | C | A | G | III ↓ |
|---|---|---|---|---|---|
| U | Fe<br>Fe<br>Leu<br>Leu | Ser<br>Ser<br>Ser<br>Ser | Tir<br>Tir<br>«NS»<br>«NS» | Cis<br>Cis<br>«NS»<br>Tri | U<br>C<br>A<br>G |
| C | Leu<br>Leu<br>Leu<br>Leu | Pro<br>Pro<br>Pro<br>Pro | His<br>His<br>GluN<br>GluN | Arg<br>Arg<br>Arg<br>Arg | U<br>C<br>A<br>G |
| A | Ileu<br>Ileu<br>Ileu<br>Met | Tr<br>Tr<br>Tr<br>Tr | AspN<br>AspN<br>Lis<br>Lis | Ser<br>Ser<br>Arg<br>Arg | U<br>C<br>A<br>G |
| G | Val<br>Val<br>Val<br>Val | Ala<br>Ala<br>Ala<br>Ala | Asp<br>Asp<br>Glu<br>Glu | Gli<br>Gli<br>Gli<br>Gli | U<br>C<br>A<br>G |

En esta tabla, la primera letra de cada triplete es leída en la columna vertical de la izquierda, la segunda en la hilera horizontal, la tercera en la columna vertical de la derecha. Los nombres de los radicales aminoácidos correspondientes están resumidos (cd. Tabla de los radicales: Tabla 1, págs. 172 y 173).

el código figura en esta tabla con su escritura en alfabeto ARN y no ADN.

Se ve que, para la mayoría de los aminoácidos, existen varias notaciones diferentes, bajo la forma de «tripletes» de nucleótidos. En un alfabeto de cuatro letras se pueden en efecto formar $4^3 = 64$ «palabras» de tres letras. Por ello no hay que especificar más que 20 residuos.

Por el contrario, tres tripletes (UAA, UAG, UGA) se nombran «NS» (*non-sens* = sin sentido), porque no designan ningún

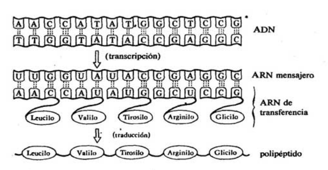
aminoácido. Juegan sin embargo un papel importante como signos de puntuación en la lectura de la secuencia nucleotídica.

El mecanismo de la traducción propiamente dicho es complejo; numerosos constituyentes macromoleculares intervienen. El conocimiento de este mecanismo no es indispensable para la inteligencia del texto. Basta con mencionar los intermediarios que manejan en suma la clave de la traducción. Los ARN llamados de «transferencia». Estas moléculas comportan en efecto:

1.º un grupo «aceptor» de aminoácidos; enzimas especiales reconocen por una parte un aminoácido, por la otra un ARN de transferencia particular, y catalizan la asociación (covalente) del aminoácido con la molécula de ARN;

2.º una secuencia *complementaria* de cada uno de los tripletes del código, lo que permite a cada ARN de transferencia emparejarse al triplete correspondiente del ARN mensajero.

Este emparejamiento tiene lugar en asociación con un constituyente complejo (el ribosoma) que juega en suma el papel de «mesa de taller» donde se ensamblan los diversos constituyentes del mecanismo. El ARN mensajero es leído secuencialmente, mecanismo aún mal comprendido, que permite al ribosoma progresar, triplete a triplete, a lo largo de la cadena polinucleotídica. Cada triplete a su vez se empareja en la superficie del ribosoma con el ARN mensajero correspondiente, portador del aminoácido especificado por este triplete. Una enzima cataliza en cada etapa la formación de una unión peptídica entre el aminoácido que lleva el ARN y el aminoácido precedente, en la extremidad de la cadena polipeptídica ya formada, que aumenta así en una



unidad. Después de ello, el ribosoma progresa un triplete, y el proceso recomienza.

La figura anterior da un esquema de principio del mecanismo de transferencia de la información correspondiente a una secuencia (arbitrariamene escogida) en el ADN.

El ARN mensajero, en esta figura, se supone transcrito a partir de la fibra de ADN marcada por un asterisco. En la realidad, los ARN de transferencia se emparejan uno tras otro al mensajero. Para que resulte más claro, se los ha colocado aquí emparejados simultáneamente.

### 4. *Sobre la significación del segundo principio de la termodinámica*

Se ha escrito tanto sobre la significación del segundo principio, sobre la entropía, sobre la «equivalencia» entre la entropía negativa y la información, que parece inútil volver a abordar este tema. Un repaso podrá sin embargo servir a algunos lectores.

En su primera forma, puramente termodinámica (enunciada por Clausius en 1850, como generalización del Teorema de Carnot), el segundo principio prevé que, *en un recinto energéticamente aislado,* todas las diferencias de temperatura deben tender a anularse *espontáneamente.* O, y esto supone lo mismo, el principio estipula que, en el seno de un recinto así, donde la temperatura sería uniforme, es imposible que aparezcan diferencias de potencial térmico entre diferentes regiones del sistema. De donde proviene la necesidad de gastar energía para enfriar una nevera, por ejemplo.

Entonces, en un recinto a temperatura uniforme, donde no subsiste ninguna diferencia de potencial, no puede tener lugar ningún fenómeno (macroscópico). El sistema es *inerte.* Es en este sentido que se dice que el segundo principio prevé la *degradación* ineluctable de la energía en el seno de un sistema aislado, como el Universo. La «entropía» es la cantidad termodinámica que *mide* el nivel de degradación de la energía de un sistema. Según el segundo principio, por consecuencia, todo fenómeno, sea cual sea, es acompañado necesariamente de un aumento de entropía en el seno del sistema donde acontece.

Es el desarrollo de la teoría cinética de la materia (o mecánica estática) el que debía revelar la significación más profunda y más general del segundo principio. La «degradación de la ener-

gía», o el aumento de entropía, es una consecuencia estáticamente previsible de los movimientos y colisiones al azar de las moléculas. Sean, por ejemplo, dos recintos a temperaturas diferentes, puestos en comunicación uno con el otro. Las moléculas «calientes» (es decir rápidas) y las moléculas «frías» (es decir lentas) van a pasar, en el azar de su recorrido, de un recinto al otro, lo que anulará inevitablemente la diferencia de temperatura entre los dos recintos. Se ve, gracias a este ejemplo, que el aumento de entropía, en un sistema así, está ligado a un aumento de *desorden:* las moléculas lentas y rápidas, primeramente separadas, están ahora mezcladas, y la energía total del sistema se reparte estáticamente entre todas, debido a sus colisiones; además, los dos recintos, al comienzo discernibles (por su temperatura) se vuelven equivalentes. Antes de la mezcla, el sistema podía realizar trabajo, ya que comportaba una diferencia de potencial entre los dos recintos. Una vez alcanzado el equilibrio estático, ningún fenómeno puede producirse ya en el seno del sistema.

Si el aumento de entropía mide el aumento del *desorden* en un sistema, un aumento de orden corresponde a una disminución de entropía o, como se prefiere a veces decir, a un enriquecimiento de entropía negativa. Sin embargo, el grado de orden de un sistema es definible en otro lenguaje: el de la información. El orden de un sistema, en este lenguaje, es igual a la cantidad de información necesaria para la *descripción* de este sistema. De donde proviene la idea, debida a Szilard y a Léon Brillouin, de una cierta equivalencia entre «información» y «entropía negativa» (ver pág. 64). Idea extremadmente fecunda, pero que puede dar lugar a generalizaciones o asimilaciones imprudentes. Es sin embargo legítimo considerar que uno de los enunciados fundamentales de la teoría de la información, a saber, que la transmisión de un mensaje se acompaña necesariamente de una cierta disipación de la información que contiene, es el equivalente, en informática, del segundo principio en termodinámica.

# Índice

Este libro se terminó de
imprimir en los talleres
de Printer, industria gráfica, sa
de Sant Vicenç dels Horts,
el día 7 del mes de Agosto
de 1985